

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Surala**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování
Specializace: 70 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Měření a vyhodnocení vibrací na suché podtlakové pumpě typu GXS**
Measurement and Evaluation of Vibration on Dry Vacuum Pump Type GXS

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce proved'te porovnání stávajícího měření vibrací s běžnými měřicími postupy u suché vývěvy typu GXS, jako je následný sběr a analýza dat, vyhodnocení vibračních spekter atd. Zhodno'te stávající proces měření, popřípadě navrhněte lepší způsob měření a vyhodnocení, vhodnější umístění snímačů apod.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Další podrobnější specifikace provede vedoucí bakalářské práce a firma Edwards, s.r.o.

Seznam doporučené odborné literatury:

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

**Vysoká škola báňská
Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní**



***Měření a vyhodnocení vibrací na suché podtlakové pumpě
typu GXS***

Measurement and Evaluation of Vibration on Dry Vacuum Pump Type GXS

Student:

Martin Surala

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D

2012

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

18.5.2012



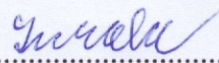
podpis studenta

Prohlašuji, že

- ✓ jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- ✓ беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- ✓ souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- ✓ bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- ✓ bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- ✓ беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- ✓ jsem se zavázal společnosti Edwards, s.r.o, že jimi poskytnuté informace budou použity pouze pro studijní účely a zpracování bakalářské práce a nebudou sděleny jiným osobám jakoukoliv formou.

V Ostravě

18.5.2012


.....
podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SURALA, M. Měření a vyhodnocení vibrací na suché podtlakové pumpě typu GXS. Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 85 s. Diplomová práce, vedoucí Blata, J.

Bakalářská práce řeší problematiku kontroly vývěvy GXS pomocí naměřených vibrací, z kterých můžeme určit celkovou diagnosu a provozuschopnost vakuové pumpy. První kapitoly bakalářské práce jsou věnovány seznámení s problematikou aplikace technické diagnostiky zejména vibrodiagnostiky. V další kapitole jsme byly seznámení s problematikou teorii vakua a jeho uplatnění ve světě.

V poslední části kapitoly bakalářské práce jsme řešily aplikaci vibrodiagnostiky a vyhodnocení naměřených dat z vakuové pumpy, možnost lepšího umístění snímačů nebo změnu měřicí metody vibrací, díky které můžeme přesněji detekovat zdroj vibrací z jednotlivých součástí vakuové pumpy.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SURALA, M. Measurement and Evaluation of Vibration on Dry vacuum Pump Type GXS. Ostrava: Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Ostrava, 2011, thesis, leader Blata, J.

Bachelor solves the issue of control a vacuum pump GXS by measuring vibrations, from which we can determine the overall diagnosis and the ability to use vacuum pump. The first chapter of thesis is addressed to introduction of the application of technical diagnostics especially Vibrodiagnostics. In the next chapter, we were familiar with the problem of vacuum theory and its application in the world.

In the last chapter of the thesis, is addressed to the application of Vibrodiagnostics and evaluation of measured data from the vacuum pump, the possibility of better sensor location or change the method of measuring vibrations, thanks that we can detect the source of vibrations of the separate components of vacuum pumps more accurately.

Obsah	Stránky
Seznámení symbolů a zkratk	6
1. Úvod	7
2. Představení společnosti Edwards	8
2.1 Historický strom růstu	8
3. Vibrodiagnostika	9
3.1 Základní definice a terminologii	9
3.2 Historický vývoj	10
4. Mechanické kmitání strojního zařízení	11
4.1 Charakteristika základní parametry mechanického kmitání	11
4.1.1 Periodické kmitání	11
4.1.2 Stacionární kmitání	14
4.1.3 Nestacionární náhodné kmitání	16
5. Měření a vyhodnocování vibrací	16
5.1 Snímače vibrací	16
5.2 Klasifikace signálů	21
5.2.1 Algoritmus FFT a jeho vlastnost	23
5.2.2 Měření a vyhodnocování spekter signálů	24
5.3 Cíle měření a zhodnocení vibrací, zásady volby měřících míst	27
5.4 Základní metody vibrační diagnostiky	30
5.4.1 Frekvenční analýza pomocí FFT	30
6. Vakuum	32
6.1 Základní pojmy a teorie vakua	32
6.2 Jednotky	33
6.3 Získávání vakua	35
6.4 Typy vývěv	36
6.4.1 Mechanické vývěvy	37
6.4.2 Hybnostní vývěvy	40
6.4.3 Absorbční vývěvy	45
6.5 Využití vakuové techniky v technologii a průmyslu	48

7. Průmyslová suchá vakuová pumpa Typu GXS	51
7.1 První zmínky o suché vakuové pumpě je roku 1986	51
7.2 Konstrukční provedení vakuové pumpy	51
7.3 Typy a systémové označení	52
8. Aplikace vibrodiagnostiky na vakuovou pumpu	53
8.1 Volba měřicí metody	53
8.1.1 Průběh měření	53
8.1.2 Vyhodnocení dat	55
9. Závěr	57
Použitá literatura	58

Seznámení symbolů a zkratk

Zkratka-veličina	Význam	Použitá jednotka
TBD	Technická bez demontážní diagnostika	[-]
FTT	Rychlá Fourierova transformace	[-]
f	Frekvence	[Hz]
v	Rychlost	[mm/s]
t	Čas	[s]
a	Zrychlení	[mm/s ²]
F _f	Faktor tvaru	[dB]
F _c	Faktor vrcholu	[dB]
RMS	Střední kvadratická hodnota	[-]

1 Úvod

Vývěvy jsou základním prvkem vakuové techniky, která je technicko-vědním oborem zabývající se procesy při tlaku nižším, než je atmosférický. Za poslední tři desetiletí došlo v tomto oboru k velkému pokroku a dnes je již jen málo průmyslových odvětví, kde se nepoužívá vakuová technika alespoň nepřímo.

Asi první využití vakua v praxi při výrobě žárovek. Vakuum zde slouží k ochraně Wolframového vlákna před chemickou degradací. V dnešní době se ale vakuum využívá v podstatě v každém průmyslovém odvětví potravinářském, chemickém, hutním a strojním průmyslu. Televizní obrazovky, displeje mobilních telefonů a solární panely i zde má hlavní velký podíl vakuum.

Bakalářská práce byla vypracována ve spolupráci školy se společností Edwards s. r. o, která je leaderem ve výrobě vakuové techniky. Hlavním cílem této firmy není jen zisk, ale také udržení zákazníka, získávání nových a mít vždy náskok na trhu před konkurencí. K zajištění kvalitních a bezporuchových vývěv si společnost dodržuje zásadní podmínky provozu, kdy jeden zaměstnanec při montáži jednotlivých dílů kontroluje toho druhého, aby se předešlo poruchám a reklamám, což by mohlo výrazně poškodit jméno společnosti.

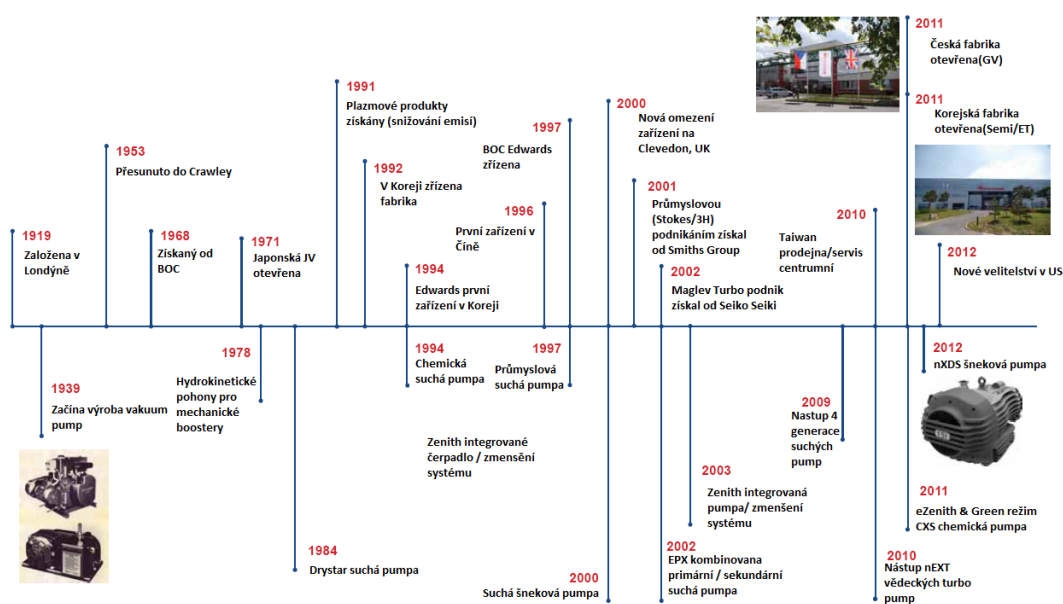
V této bakalářské práci se především zaměřím na aplikaci vibrodiagnostiky na vakuovou pumpu GXS, která je hodně důležitým faktorem při výrobě a ve vývoji nových technologií vakuových pum. Cílem je aplikovat vibrodiagnostiku na vakuovou pumpu zvolit si měřící metodu vibrací, umístění snímačů a vyhodnotit naměřena data. Po vyhodnocení naměřených dat posoudím danou měřící metodu s měřící metodu společnosti Edwards s.r.o. a popřípadě navrhnou změnu metody měření nebo změnu umístění snímačů při měření vibrací.

2 Představení společnosti Edwards:

Společnost Edwards je jedním z předních výrobců vakuových technologií pro průmyslové, vědecké a polovodičové aplikace.

Tato firma pocházející z Anglie, kde byla v roce 1919 založena F. D. Edwardsem. V současnosti najdeme její výrobní závody nejen ve velké Británii, ale také například v USA, Izraeli, Singapuru či Japonsku, avšak mezi největší patří výrobní závody v Koreji a České republice. Společnost Edwards vynalezla koncepci bezolejových vývěv a v současnosti jich má na trhu celou řadu, založených na různých principech. Dále společnost nabízí svým zákazníkům rotační lopatkové, difuzní a turbomolekulární vývěvy.

2.1 Historický strom růstu a inovací



3. Vibrodiagnostika

Využívá jako diagnostického parametru vibrace. A právě tento diagnostický parametr dává informace k určení objektivního technického stavu rotujících částí stroje. Sem vždy patří intenzivnější mechanické chvění (kmitání).

Kmitání je vratný pohyb, který vykonává těleso o určité hmotnosti, na které působí síly charakteristické pro danou soustavu.

Většina dnešních výrobních společností pracuje s minimálními zisky, což samozřejmě vede k nutnosti snižování výrobních nákladů a právě proto se v moderním podnikání stává mocným nástrojem i řešení dříve opomíjených problémů. K těmto mocným nástrojům patří také řešení údržby, včetně její zajištění za podmínek systémového procesního chápání dané problematiky.

K nejdůležitějším prostředkům zajištění údržby patří metody technické diagnostiky, tzn. i vibrodiagnostiky, které v celé své šíři působnosti nejvýrazněji ovlivňují obsah údržby v celé své komplexnosti. V praxi tzn., že technická diagnostika je hlavním nástrojem kontrolně inspekční a revizní činnosti (zjišťování technického stavu a opotřebení), rozhoduje o nutnosti a rozsahu prováděných oprav (odstraňování následků opotřebení), patří k nástrojům a prostředkům autonomní údržby (snižování rychlosti opotřebení), kde ohodnocuje dodržování zásad správného provozu.

Technická diagnostika je tedy základním atributem ovlivňujícím rozhodujícím způsobem bezpečnost provozu, tzn. je také prostředkem ke snižování rizika v obecném smyslu.

3.1 Základní definice a terminologie

Základním cílem sledování vibrací rotujících strojů je poskytnutí informací o provozním a technickém stavu za účelem zabezpečení strategického plánování a řízení údržby. Nedílnou součástí uvedeného procesu se tak stává i hodnocení stavu a průběhu vibrací za dobu dosavadního provozu.

Je nutno si uvědomit, že vibrace u rotujících strojů jsou úzce vázány na dynamické namáhání stroje, souvisí se stavem ložisek, převodovek, nevývahou, nesouosostí, trhlinami v důležitých komponentech, opotřebením apod., takže jejich monitorování a vyhodnocení patří k základním a rozhodujícím metodám technické diagnostiky.

Vzhledem k tomu, že v dalších kapitolách (4a 5) jsou uvedeny základní termíny týkající se kmitání, vibrací a vyhodnocování vibrací, tak zde se soustředíme pouze na objasnění nejzákladnějších pojmů technické diagnostiky.

DIAGNÓZA – analýza okamžitého technického stavu objektu resp. vyhodnocení provozuschopnosti objektu za daných provozních podmínek. Základní úkoly diagnózy jsou

Detekce – odhalení existence vznikající poruchy.

Lokalizace – určení místa, vadné části nebo uzlu vznikající poruchy.

Specifikace – stanovení příčiny vznikající poruchy vyhodnocením

diagnostického signálu tzn. okamžitým stanovením a geneze po dobu provozu.

Predikace – určení prognózy zbytkové životnosti (času do nutné opravy).

3.2 Historický vývoj

Vlastní vývoj vibrodiagnostiky ve své podstatě kopíruje vývoj metod technické diagnostiky, tzn. od pocitových a vizuálních vjemů, přes jednoduché snahy o zesílení vibračního, resp. hlukového signálu se dostáváme až k použití nejmodernější měřicí techniky s maximalizací vypovídající schopností o technickém stavu sledovaného objektu.

Za zlom je nutno považovat nasazení informačních technologií (výpočetní techniky), které přineslo převratné změny do celé řady oblastí tzn. i do údržby a vibrodiagnostiky. Umožnilo nejen měření vibračního signálu, ale především možnost jeho vyhodnocení v reálném čase.

Daný vývoj pak následně kopírují i jednotlivé vývojové stupně systémů provozní údržby, čímž plně zajistíme naplnění základních cílů nutných k zajištění správného provozu objektu (bezporuchovost, zajištěnost údržby, udržitelnost). Z pohledu technické diagnostiky pak mluvíme o

DIAGNOSTIKOVATELNOSTI – vlastnost objektu vyjadřující

způsobilost k použití diagnostických prostředků

a nepřímo také o

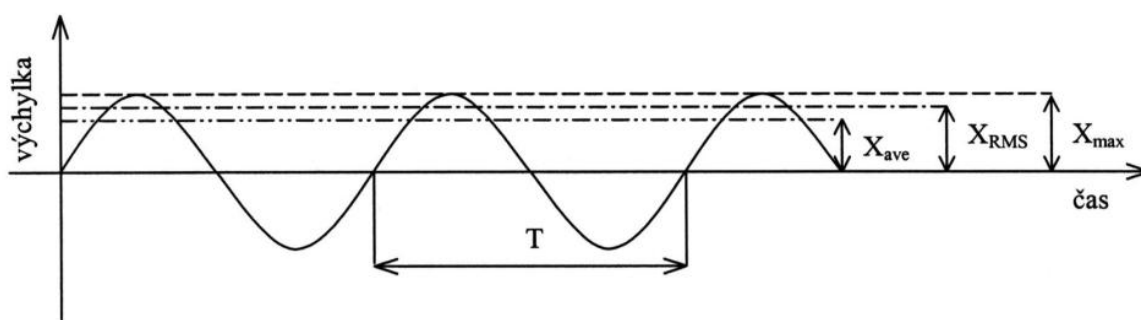
OPRAVITELNOSTI – zajištění možnosti výměny, resp. opravy (totální havárie si vynucuje nákup nového stroje).

4. Mechanické kmitání strojího zařízení

4.1 Charakteristika základní parametry mechanického kmitání

4.1.1 Periodické kmitání

U periodického kmitání se po stejné době, periodě, pravidelně opakuje stejný časový průběh. Nejjednodušším periodickým kmitáním je harmonické kmitání.[1]



Obr. 1. Příklad harmonického kmitání s vyznačením maximální amplitudy, střední kvadratické a absolutní hodnoty

Frekvence kmitání:

$$f = \frac{1}{t}.$$

[1]

Pro posuvné kmitání je okamžitá **výchylka**:

$$x = X_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{\max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = X_{\max} \cdot \sin(\omega t).$$

[1]

kde je $\omega = 2\pi \cdot f$...kruhová frekvence

X_{\max} ...maximální výchylka-amplituda výchylky.

Rychlost:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot X_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

[1]

Zrychlení:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot X_{\max} \cdot \sin(\omega t) = -A_{\max} \cdot \sin(\omega t) = A_{\max} \cdot \sin(\omega t + \pi)$$

[1]

kde je A_{\max} ...maximální zrychlení-amplituda zrychlení

V_{\max} ...maximální rychlost-amplituda rychlosti

t ...čas

Další veličiny jsou:

$$\text{Střední absolutní hodnota: } X_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x| \cdot dt \quad [1]$$

$$\text{Střední kvadratická hodnota: } X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x^2 \cdot dt} \quad [1]$$

RMS hodnota je významná tím, že obsahuje informace o výkonu kmitání.

Pro harmonický pohyb platí

$$X_{\text{RMS}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot X_{\text{ave}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot X_{\text{max}} [1]$$

Obecněji lze závislosti vyjádřit:

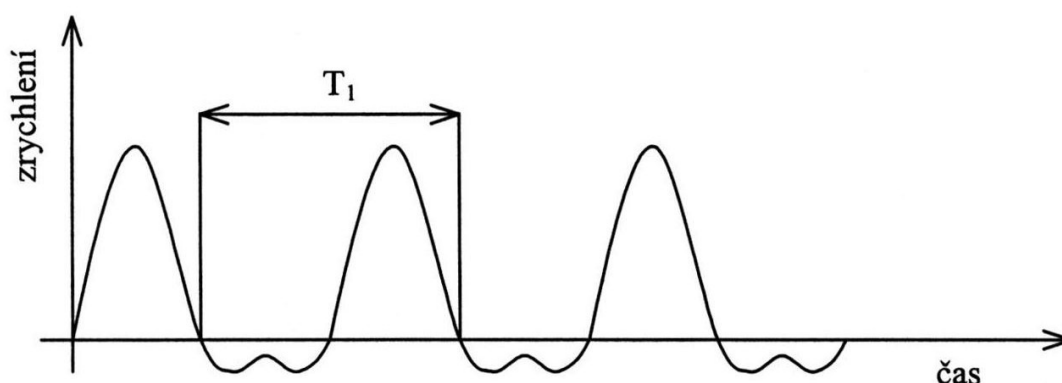
$$X_{\text{RMS}} = F_f \cdot X_{\text{ave}} = \frac{1}{F_c} \cdot X_{\text{max}} [1]$$

$$\text{kde je } F_f = \frac{X_{\text{RMS}}}{X_{\text{ave}}}, F_c = \frac{X_{\text{max}}}{X_{\text{RMS}}} [1]$$

$$\text{Faktor } F_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \doteq 1,11 (\approx 1\text{dB}) \dots \text{faktor tvaru} [1]$$

$$\text{a } F_c = \sqrt{2} \doteq 1,414 (= 3\text{dB}) \dots \text{faktor vrcholu} [1]$$

Většina kmitání není čistě harmonickým pohybem. Příklad neharmonického periodického pohybu je uveden na obr. 4.



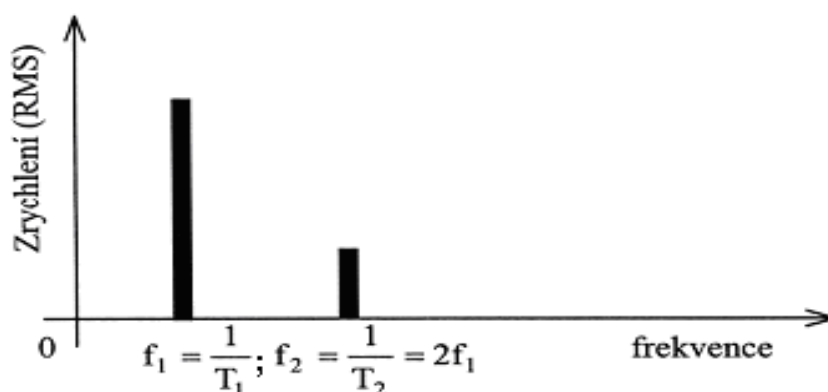
Obr. 2. Příklad neharmonického periodického pohybu

Určením hodnot max., ave, RMS a faktoru tvaru a faktoru vrcholu získáme informace, na jejichž základě můžeme určit, že se nejedná o harmonický pohyb. Pro praktickou potřebu je nutno tyto informace doplnit.

Velmi účelnou metodou pro popis kmitání je **frekvenční analýza**. Tato metoda je založena na matematickém teorému formulovanému **Fourierem**: Jakoukoliv periodickou funkcí lze vyjádřit jako kombinaci harmonických funkcí a celistvými násobky základní frekvence.

$$F(t) = X_0 + X_1 \cdot \sin(2\omega \cdot t + \varphi_1) + X_2 \cdot \sin(2\omega \cdot t + \varphi_2) + X_3 \cdot \sin(3\omega \cdot t + \varphi_3) + \dots + X_n \cdot \sin(n\omega \cdot t + \varphi_n) \quad [1]$$

Jednotlivé harmonické složky tvoří **frekvenční spektrum**. Frekvenční spektrum periodického pohybu, jehož časový průběh je zakreslen na obr. 2. je uvedeno na obr. 3.

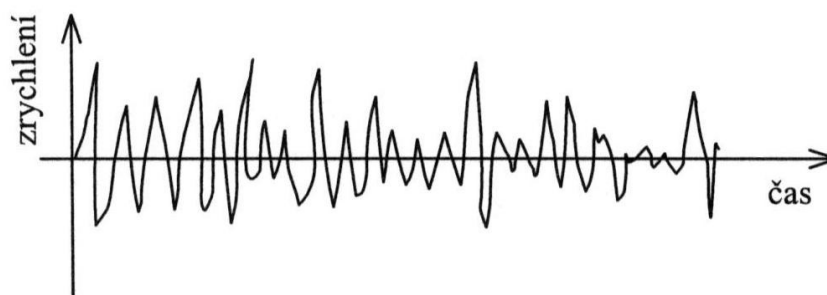


Obr.3. Příklad periodického signálu ve frekvenční oblasti

Charakteristickým rysem frekvenčního spektra periodického pohybu je, že se jedná o diskrétní čárové spektrum.

4.1.2 Stacionární náhodné kmitání

Náhodné kmitání je charakteristické tím, že se jeho průběh nikdy přesně neopakuje viz. obr. 6. Zatímco u deterministických dějů lze předvídat průběh sledované veličiny jako výchylky, rychlosti nebo zrychlení v každém časovém okamžiku, u náhodných procesů tomu tak není. Při vyšetřování náhodně kmitajících soustav se využívá poznatků ze statistiky ve spojení s **harmonickou analýzou**.



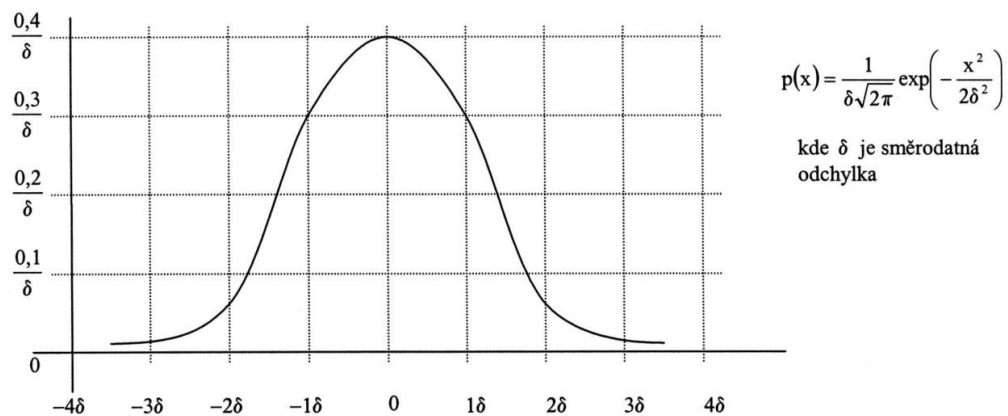
Obr 4. Příklad signálu náhodného kmitání

K popisu stacionárního náhodného kmitání se nejčastěji používá **hustota pravděpodobnosti**

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x) - P(x + \Delta x)}{\Delta x} [1]$$

kde $P(x)$ je pravděpodobnost, že hodnota výchylky bude vyšší než x a $P(x + \Delta x)$ že hodnota výchylky bude vyšší než $(x + \Delta x)$

Nejznámější rozdělení hustoty pravděpodobnosti je Gaussova křivka,



Obr 5. Normalizovaná Gaussova křivka hustoty pravděpodobnosti

Základní informaci o charakteru časového průběhu lze získat pomocí **autokolerační funkce**. Tato funkce vyjadřuje, jak hodnota výchylky závisí na hodnotě předcházející výchylky.

$$\psi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot f(t + \tau) \cdot dt [1]$$

Velmi důležitou informaci o náhodném kmitání poskytuje **výkonová spektrální hustota** daná vztahem přímé Fourierovy transformace autokolerační funkce.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\tau) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot \tau} \cdot d\tau$$

[1]

4.1.3 Nestacionární náhodné kmitání

Nestacionární náhodné kmitání lze definovat jako náhodné kmitání, jehož statistické vlastnosti se s časem mění.

Teoreticky všechny druhy náhodného kmitání vyskytující se v praxi jsou nestacionární, neboť jejich statistické vlastnosti se s časem mění. Z inženýrského hlediska mohou být změny statistických vlastností tak pomalé, nebo mít takový charakter, že kmitání v mnoha případech můžeme považovat za stacionární. Pro analýzu silně nestacionárního kmitání je nutno používat speciální metody, jejichž podstatou je průměrování.[1]

5. Měření a vyhodnocování vibrací

Provoz všech strojů vázaný na rotující pohyb je tedy provázen mechanickým kmitočtem - vibracemi, kterým se nelze v provozní praxi vyhnout.

Vibrace jsou, jak už bylo zmínka, zapříčiněny dynamickým namáháním stroje, technickým stavem ložisek, hřídelí, převodovek, nevývahou rotujících částí, nesouosostí, vůlemi pohybových součástí, stykem třecích ploch, střetem dvou navzájem pohybujících těles (rázy), apod.

Vibrodiagnostika využívá jako diagnostického parametru vibrace, a právě tento diagnostický parametr dává informace k určení objektivního technického stavu rotujících strojů. Včasná detekce možné závady je pak základním předpokladem pro strategické plánování nápravných opatření.

5.1 Snímače vibrací

Při měření vibrací by měl výstupní signál co nejvěrněji odpovídat průběhu mechanického kmitání, což není úkol lehký a tomu také plně odpovídá možný rozsah předkládané kapitoly. Z těchto omezujících důvodů se pokusíme text poněkud komprimovat a cíleně zaměřit na bezpodmínečně nutné údaje.

Je možno uvést, že ve své podstatě existují dva základní typy snímačů pro monitorování vibračního stavu

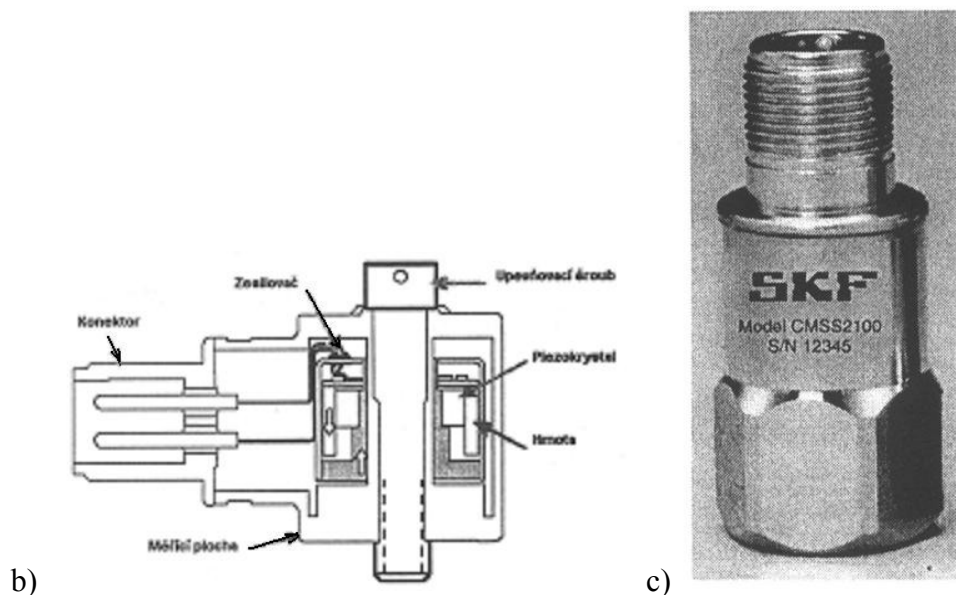
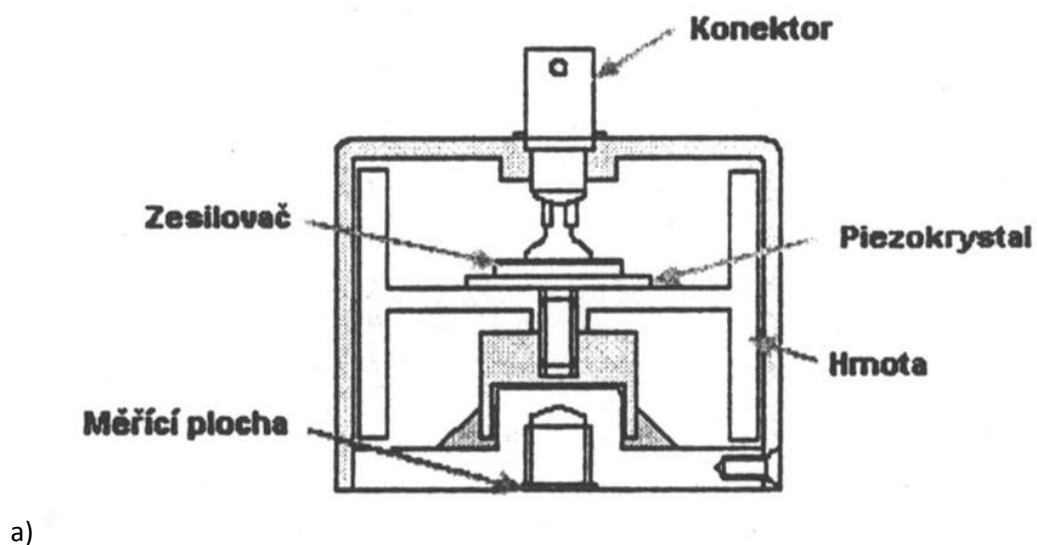
- Seismická zařízení, která se normálně montují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce.
- Snímače relativní výchylky, které měří vibrační výchylku a střední polohu mezi rotujícími a nerotujícími elementy.

Existují jistá měření na strojích, která vyžadují jiné typy snímačů, jako jsou tenzometry. Avšak jejich použití pro monitorování vibračního stavu je méně obvyklé.

Vlastní výběr odpovídajících snímačů závisí na dané aplikaci, tzn. měřené veličině (výchylka, rychlost, zrychlení) vibrací, zda měříme absolutní nebo relativní vibrace (relativní např. vibrace hřídele vůči ložiskovému domku), zda provádíme měření nízkofrekvenčních, či běžných frekvenčních vibrací apod. Takže snímače pro monitorování stavu vibrací pak jsou následující.

Nejrozšířenější jsou **akcelerometry**, jejichž výstup může být zpracován tak, aby dával libovolnou veličinu (zrychlení, rychlost, výchylku vibrací). Akcelerometr je seismické zařízení, které generuje výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Obecně se akcelerometry montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Akcelerometry jsou dostupné s různými montážními rezonančními frekvencemi, v typickém případě od 1 kHz výše. Obecně se doporučuje, aby lineární rozsah namontovaného akcelerometru pokrýval sledované frekvence. Je obvyklé integrovat výstup z akcelerometru tak, aby dával signál úměrný rychlosti. Avšak je nezbytné dávat pozor při dvojnásobné integraci na výchylku, zejména při nízkých frekvencích. [1]

Akcelerometry jsou dostupné v různých velikostech, Jsou charakterizovány velkým dynamickým rozsahem (1 ku 10⁶) a širokým frekvenčním rozsahem. Jsou přednostně používány v aplikacích s malými objekty majícími malou montážní plochu, při vysokých teplotách prostředí nebo v silných magnetických polích. Typický akcelerometr obsahuje jeden nebo několik piezoelektrických krystalových elementů. Piezoelektrický krystal vytváří elektrický náboj, který je úměrný působící síle, a podle jeho umístění a hmoty ve snímači rozeznáváme dva druhy akcelerometrů, **tlakový** a **smykový** (obr. 6)



Obr. 6. Akcelerometry:

a) tlakový

b) smykový

c) skutečné provedení

Snímač rychlosti vibrací, jehož výstup lze integrovat na výchylku vibrací. Snímač rychlosti je seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný mechanické vibrační rychlosti tělesa. Obecně se snímače rychlosti montují na stacionární (nerotující)

konstrukci stroje. Typický snímač rychlosti vibrací má uvnitř snímače cívkou, která vlivem vibrací kmitá v poli permanentního magnetu.

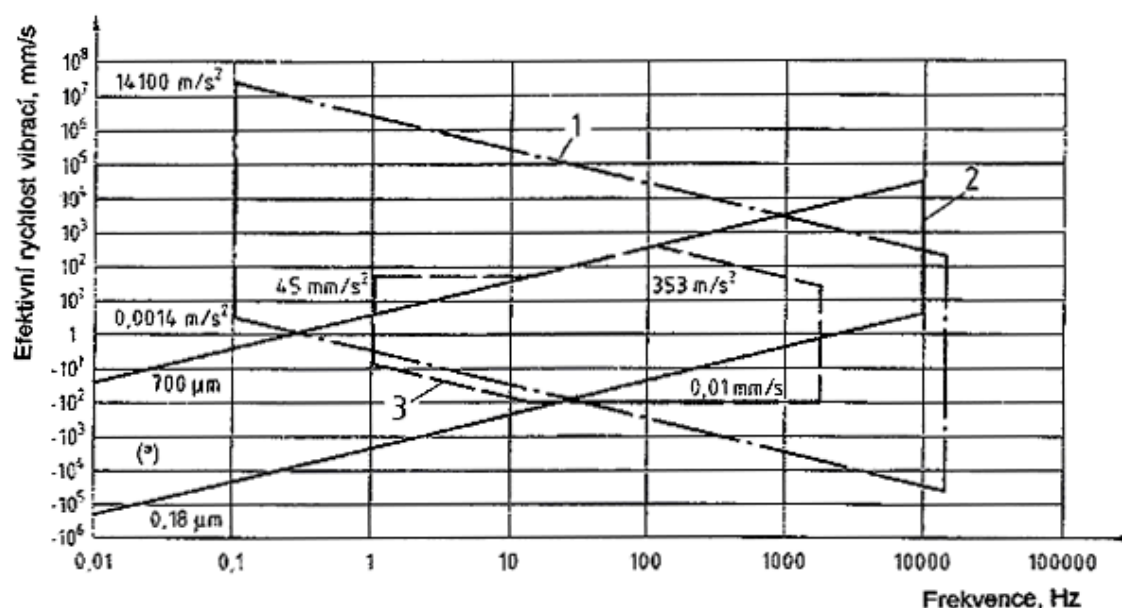
Bezdotyková sonda, jejíž výstup je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje

U rotujících strojů zejména u velkých rozhodujících turbinových strojů, a u strojů u nichž hmotnost nosné konstrukce je velká ve srovnání s hmotností rotoru, může být nezbytné měřit relativní výchylku mezi rotorem a konstrukcí statoru. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které může přímo ověřit vibrační výchylku rotujícího hřídele vůči stacionárnímu ložisku nebo skříni stroje. Snímač výchylky dává střídavou složku pro vibrační pohyb a stejnosměrnou složku pro polohu.

Když je snímač výchylky použit v kombinaci se seismickým snímačem na skříni, jehož signál je integrován tak, aby dával výchylku, lze získat měření absolutní výchylky hřídele tak, že se vektorově sečtou dva signály výchylky. Pokud je fázový posun výstupních signálů seismického snímače a snímače výchylky různý, musí být tento kompenzován v zařízení na úpravu signálů pro kombinaci snímačů.

Většina používaných snímačů výchylky pracuje na principu vířivých proudů. Cívka, kterou prochází vysokofrekvenční střídavý proud generuje vysokofrekvenční magnetické pole. Pokud jsou do tohoto pole vloženy elektricky vodivé materiály (například hřídel stroje), jsou v materiálu generovány vířivé proudy, které berou energii z vysokofrekvenčního magnetického pole.

ČSN ISO 13373-1 uvádí pro výběr z uvedených tří typů snímačů tzv. závislost dynamického rozsahu na frekvenci, která zahrnuje rozsahy většiny aplikací pro monitorování stavu vibrací – obr. .



Obr. 7 Závislost dynamického a frekvenčního rozsahu při aplikaci snímačů vibrací, které jsou typické pro použití při monitorování technického stavu stroje

1-piezoelektrický akcelerometr,

2-bezdotyková sonda na principu vířivých proudů,

3-elektromechanický snímač rychlosti až po stejnosměrnou hodnotu

Správné měření vibrací strojů je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu na snímače, tzn. rozhoduje **přípevnění snímačů**. Doporučený způsob uchycení závisí na přístupnosti, vhodnosti, ekonomické a technické úvaze. Danou problematikou se zabývá norma ČSN ISO 5348. Je nutno uvést, že způsob uchycení nejvýrazněji ovlivní frekvenční odezvu snímače, zejména při měření na vysokých frekvencích.

Tab. 1 Vliv přípevnění na snímače vibrací

Metoda přípevnění	Vliv na výkonnost snímače (např. snímače s rezonancí 30 kHz)
Pevný šroubový spoj	Žádné snížení rezonanční frekvence akcelerometru v důsledku přípevnění
Izolovaný šroubový spoj	Pokud je pro zabránění vzniku zemních smyček a jiných vlivů použit tuhý nevodivý materiál, jako je podložka ze slídy, montážní rezonanční frekvence je mírně snížena asi na 28 kHz.
Přilepení tuhým lepidlem	Rezonance je snížena asi na 28 kHz
Přilepení měkkým epoxidem	Rezonance je snížena asi na 8 kHz
Přípevnění permanentním magnetem	Rezonance je snížena asi na 7 kHz
Ruční sonda se snímačem	Rezonance je snížena asi na 2 kHz, ale tato metoda není doporučena pro měření nad 1 kHz.

V praxi je možno se setkat i s pojmem **duální snímače** (sondy). Jedná se o snímače, které měří absolutní a relativní vibrace hřídele, tzn. jedná se o kombinaci bezdotykového snímače na vířivé proudy a seismického snímače rychlosti.

Ve shrnutí je pak možno uvést, že k základním požadavkům na snímače vibrací patří:

Rezonanční kmitočet – výrazně (min 5 x) vyšší než horní mezní kmitočet měření

Hmotnost – snímače včetně úchyty by měla být min 10 x nižší než hmotnost vyšetřované soustavy

Těžiště – připevnění snímače má být nad těžištěm zdroje vibrací,

což v aplikaci na akcelerometry a nejrozšířenější druh měření – měření frekvenčních vibrací znamená, že

Rezonanční frekvence – vyšší než vysokofrekvenční signál v měřené struktuře (některé požadavky leží nad 70 kHz)

Metody uchycení – pevné uchycení pomocí šroubu je nejvhodnější způsob pro měření nad 10 kHz

Kalibrace – možnost kalibrace nad 10 kHz je běžná u širokopásových akcelerometrů (nejlehčí snímače kalibrují frekvenční odezvu až do 50 kHz).

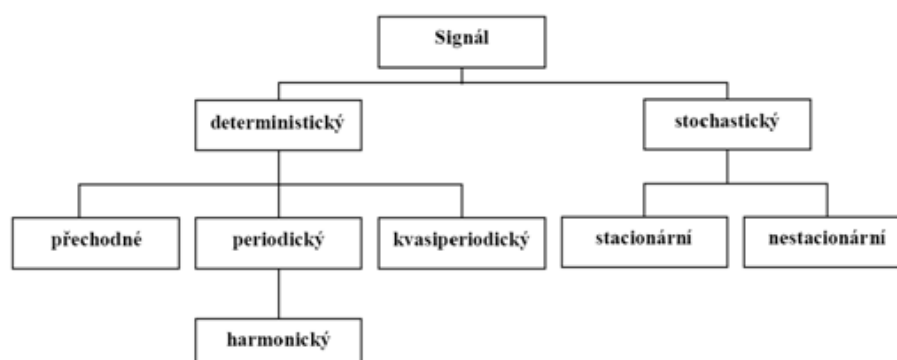
5.2 Klasifikace signálů

Abstraktní pojem „signál“ se vztahuje jen na takové časové funkce, které reprezentují časové průběhy fyzikálních veličin, a které obsahují na rozdíl od šumu jen smysluplné informace o objektu, který signál generuje. Z hlediska obecného rozdělení je klasifikace signálu znázorněna na obr. 18. Danou klasifikaci je možno ve velmi stručné podobě charakterizovat následovně:[1]

Deterministický signál – signál, jehož časový průběh je determinován (např. funkčním popisem), a proto lze jeho průběh předvídat

Stochastický signál – náhodný signál – má v průběhu záznamu nepředvídatelný vývoj

Přechodový signál – signál, který je časově omezen – např. odezva na impulsní buzení, hluk při přejezdu vozidla



Obr. 8 Klasifikace signálů podle náhodnosti jejich průběhu

Periodický signál – je složen z harmonických signálů o frekvencích, které jsou násobkem jedné základní frekvence. Z pohledu harmonického signálu lze mluvit o velmi širokém uplatnění v oboru kmitání a je obecně definován jako reálná časová funkce. Periodický signál je složen z harmonických signálů, které jsou násobkem jedné základní frekvence (vyšší harmonické – celé násobky a subharmonické – částečné násobky).[1]

Kvasiperiodický signál – signál rovněž složený z harmonických signálů s frekvencemi, které jsou násobky alespoň dvou základních frekvencí se vzájemným poměrem o velikosti, která je rovna iracionálnímu číslu.

Stacionární a nestacionární signál – průběh signálu má ustálený – stacionární – charakter nebo se v čase mění – je nestacionární. Kritérium stacionárnosti ovšem závisí na délce záznamu signálu – průběh signálu se může jevit jako stacionární za dlouhý časový úsek a nestacionární za krátký časový úsek.

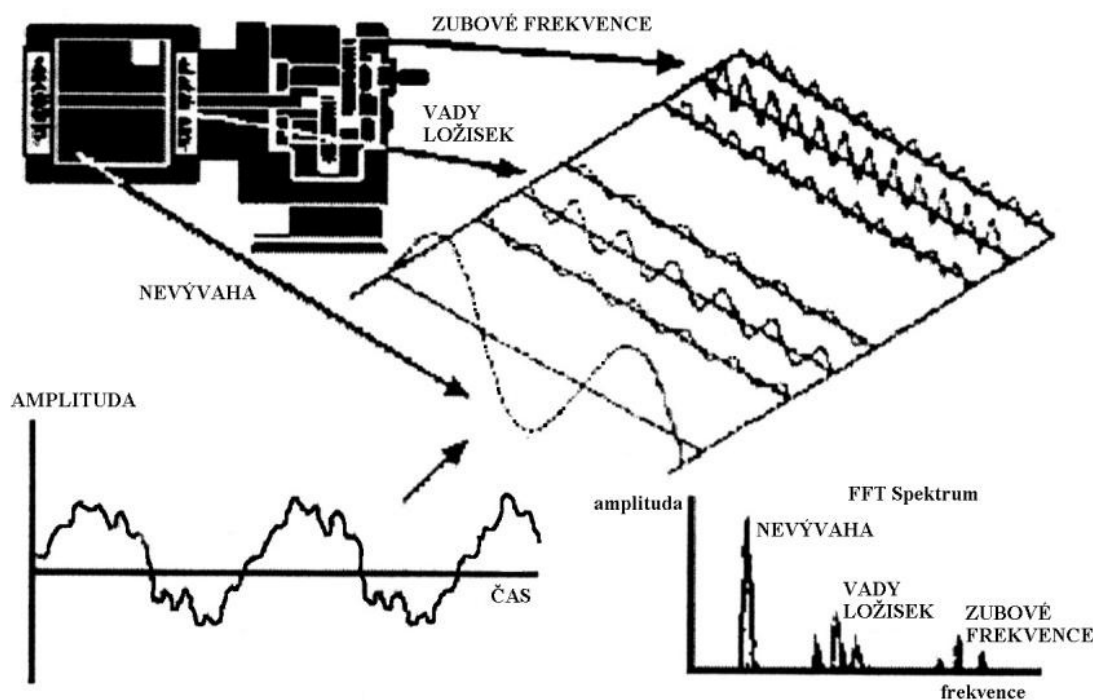
Náhodné signály rovněž mohou být širokopásmové nebo úzkopásmové. Úzkopásmový signál obsahuje jednu náhodnou frekvenci s měnící se amplitudou. Širokopásmový signál je složen z harmonických signálů s frekvencemi z širokého pásma frekvencí. Zcela náhodný signál je označován jako šum. Na strojních zařízeních se nejčastěji objevují signály periodické nebo kvasiperiodické (typický příklad zdroje kvasiperiodického signálu je právě převodovka). Blížeji k dané kapitole, stejně tak

následujícím kapitolám (5.2.1 a 5.2.2) najdeme v samostatné knížce zabývající se danou problematikou z pohledu vibrodiagnostiky [2].

5.2.1 Algoritmus FFT a jeho vlastnosti

Průběh signálu se obvykle znázorňuje v čase – v časové oblasti (doméně). Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenějším způsobem pro technické účely je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá rychlá Fourierova transformace – FFT (Fast Fourier Transformation).

Rozklad na Fourierovu řadu se týká hlavně periodických nebo kvasiperiodických signálů. Přestože počet složek rozkladu je obecně nekonečný, obsahuje tento rozklad jen složky s frekvencemi, které jsou násobky harmonické, základní frekvence opakování signálu (vyšší harmonické a subharmonické). Spektrum tak obsahuje jen izolované složky. Princip je patrný na obr. 9.



Obr. 9 Princip FFT

Podstatou FFT je volba zvláštní délky záznamu a vychází ze značného urychlení výpočtu (autoři Cooley a Tukey) Fourierovy transformace vycházející z Fourierovy řady. Vzhledem k rozsáhlosti dané problematiky odkazujeme na již uvedenou literaturu [2]., která se danou problematikou zabývá velmi podrobně. Uvedené najdeme samozřejmě i v dalších, zde nespecifikovaných publikacích, za všechny uvádíme [3], [4]. V nematematickém vyjádření je možno uvést, že FFT rozkládá signál na určité amplitudy odpovídající frekvenčním budícím složkám.

5.2.2 Měření a vyhodnocování spekter signálů

Vzhledem k již zmíněnému rozsahu dané problematiky (kap. 5.2) i zde musíme odkázat především na lit. [2] a uvést poznámku, že v následujících řádkách uvádíme jen nejnutnější pro pochopení dalších kapitol, ale přesto pro další postup je nutno ještě uvést.

Transformaci časového signálu do frekvenční domény (na frekvenční spektrum) lze provést obecně dvěma hlavními metodami:

Pomocí pásmové analýzy, kdy je signál filtrován řadou frekvenčních propustí o určité šířce pásma (oktávová analýza u akustického signálu)

Rychlou Fourierovou transformací (FFT), kdy je ze vzorku časového průběhu určitým algoritmem vypočítáno frekvenční spektrum (vibrační signály).

V technické diagnostice strojů pracujících s periodickým cyklem je frekvenční spektrum vibračního signálu základním zdrojem informací o technickém stavu a příčinách poškození jednotlivých strojních součástí, pro které existuje propracovaná metodika stanovení závadových frekvencí a ve vibrodiagnostice, resp. frekvenční analyzátory používají rychlou Fourierovu transformaci (FFT).

Frekvenční spektrum a volba časového okna

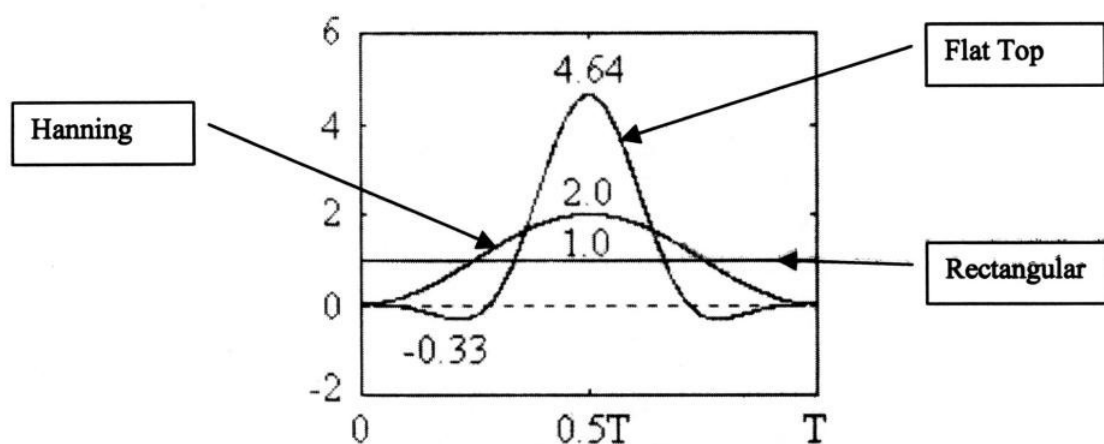
Frekvenční spektrum časového signálu je zobrazení v souřadnicích amplituda – frekvence. Z hlediska přenášené energie jsou časový průběh a frekvenční spektrum rovnocenné. U strojů s periodickým pracovním cyklem je vibrační signál způsoben těmito periodickými ději a u nichž frekvenční rozklad, tedy rozklad na množství

sinusových signálů s příslušnou amplitudou a počátečnou fází, dává diagnostikovi významný nástroj pro identifikaci technického stavu a příčin jeho případného zhoršení přiřazením jednotlivých zdrojů budícím frekvencím ve spektru vibrací, a jak už byla zmínka, tak nejrozšířenějším způsobem stanovení frekvenčního spektra je u současných analyzátorů FFT a to pro svoji přesnost, rychlost a srozumitelnost, tzn. realizovatelnost ve formě elektronického obvodu.[1]

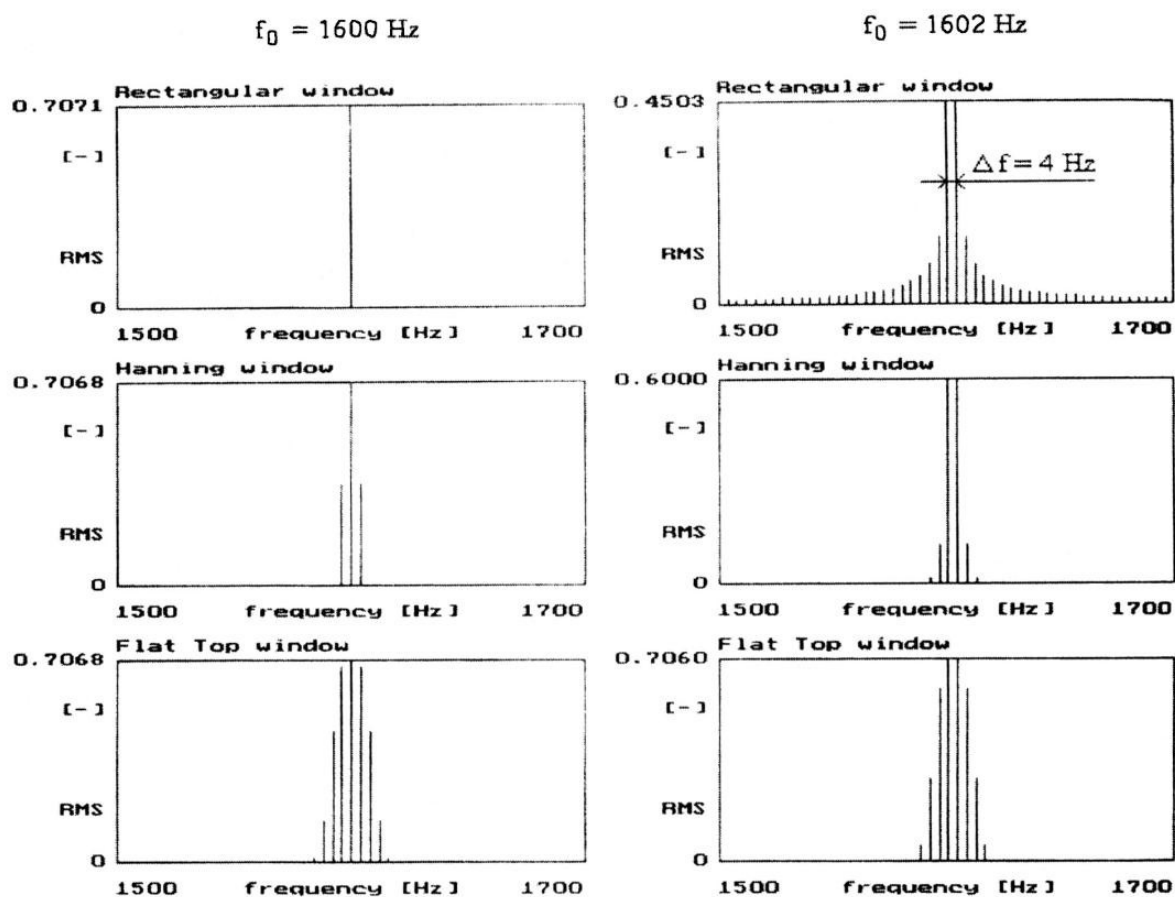
Paměť analyzátoru nabere vzorek časové funkce, který považuje za transparentní z dlouhodobého hlediska a vytvoří z něj nekonečnou smyčku. Z tohoto důvodu je nutné, aby signál začínal a končil ve stejném bodě. Pro správné provedení analýzy je nutné, aby data, která paměť vyřízne z nekonečného časového průběhu reprezentovala děje ve strojním zařízení, a aby byla před matematickým zpracováním upravena do potřebného tvaru, tak aby z nich bylo možné udělat nekonečnou smyčku. K tomu slouží časová okénka, která upravují hodnoty časového průběhu na začátku a konci naměřeného souboru. Vhodné okénko je třeba zvolit před začátkem analýzy a jeho volba výrazně ovlivňuje přesnost analýzy. Správná volba časového okna má nemalý vliv na prezentování naměřených FFT spekter. Nejznámější časová okna jsou typu Rectangular, Flat Top a Hanning. Časové průběhy oken jsou znázorněny na obr. 10.

Společnou vlastností oken typu Flat Top a Hanning je plynulý přechod z nuly na začátku a konci záznamu na rozdíl od skokové změny u okna Rectangular – okna Flat Top a Hanning dávají největší váhu signálu uprostřed záznamu, zatímco na začátku a na konci je váha nízká (u okna Flat Top dokonce záporná). [1]

Vlastnosti jednotlivých oken jsou znázorněny na obr. 21, na kterém jsou vyhodnoceny spektra o frekvenčním rozsahu 3200 Hz s rozlišením 800 čar. První signál má frekvenci 1600 Hz a druhý frekvenci 1602 Hz. V případě frekvence 1600 Hz je nejpřesnější hodnota amplitudy a frekvence u okna Rectangular (frekvence 1600 Hz je přesný násobek vzorkovací frekvence 4 Hz). Naopak u frekvence 1602 Hz je u okna Rectangular chyba největší. U frekvence 1602 Hz je nejbližší přesné hodnotě okno typu Flat Top – na rozdíl od okna Hanning spektrum ovšem obsahuje vyšší počet složek v postranním pásmu. Kompromisem z hlediska přesnosti a počtu spektrálních čar se tedy jeví okno typu Hanning [1]



Obr. 10. Časová okna



Obr. 11. Vlastnosti časových oken

Okno typu Hanning je rovněž nejvhodnější v případech, kdy není známa ani amplituda, ani frekvence složek signálu, protože účelem analýzy je tyto parametry zjistit. Pro případy, kdy je nutné znát přesnou amplitudu - např. cejchování, je nejvhodnější okno Flat Top. V případě, že spektrum obsahuje pouze složky od základní frekvence, která

odpovídá frekvenční vzdálenosti mezi složkami spektra, je nejvhodnější okno Rectangular.

Spektrální výkonová hustota a její význam při měření vibrací

Výkon spotřebovaný lineární kmitající soustavou je úměrný druhé mocnině amplitudy měřené veličiny, resp. je roven sumě výkonů připadajících na jednotlivé frekvenční složky. U signálů se spojitým spektrem je možné předpokládat, že spektrum je složeno z velkého množství frekvenčních čar (teoreticky nekonečného) s velmi blízkou amplitudou a fází. Tento ryze matematický přístup nelze uplatnit u FFT, která realizuje spektrum na konečném množství frekvenčních čar, přesto fyzikální podstatu lze chápat ve smyslu uvedených skutečností. Spektrální výkonová hustota jako veličina nachází uplatnění především při teoretických matematických úvahách při zpracování signálu. Jako jediná je z matematického hlediska jednoznačně definovaná jako Fourierova transformace autokorelační funkce. Z toho je opět zřejmé, že se zde pracuje se spojitými funkcemi a že se jedná o statistickou veličinu.

Podle teoretického výkladu lze spatřovat význam spektrální výkonové hustoty jako veličiny, která nám v určitém frekvenčním pásmu umožňuje odhadnout energii přenášenou vibrující hmotou. Vždy je tedy nutné hovořit o frekvenčním pásmu, nikoliv o diskrétní frekvenci.

Z hlediska praktického použití je spektrální výkonová hustota vhodná pro náhodné signály se spojitým spektrem. Při sledování spektra diagnostikovaných strojních zařízení má technik u moderních analyzátorů možnost vybrat zobrazenou veličinu ve spektru. Obvykle si vystačí s RMS (efektivní hodnota signálu), která k splnění všech cílů zcela postačuje. Volbou výkonové hustoty se pouze změní veličina na svislé ose spektra, ale tvar zůstane zachován.[1]

5.3 Cíle měření a zhodnocení vibrací, zásady volby měřících míst

Je možno říci ve stručnosti „Cílem není vlastní měření, ale analýza vibrací, která je prostředkem k určení příčiny problému“

Poruchy strojních rozšíření mají zřídka náhlý a zcela neočekávaný průběh, takže typický časový průběh úrovně vibrací u rotujícího stroje dané frekvenci má po dobu technického života objektu tvar tzv. „**vanové křivky**“ – blížeji v kapitole 5.4.1. a 5.4.2., což patří k základním analytickým metodám zhodnocení a vyhodnocení vibrací. Další najdete v dílčích kapitolách těchto skript. (teorie v kap. 5.4)

Vydeme-li ze základů rozdělení technické diagnostiky (např. [2]), tak můžeme technickou bez demontážní diagnostiku (TBD), kam patří veškeré diagnostické metody, jejichž podstata je měření fyzikálního parametru (vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, akustická diagnostika apod.) rozdělit v nejzákladnějším členění podle následujících hledisek:

z hlediska řešeného úkolu

- odhalení existence vznikající poruchy (DETEKCE)
- stanovení vadní součásti nebo uzlu (LOKALIZACE)
- stanovení příčiny vznikající poruchy (SPECIFIKACE)
- stanovení, resp. určení prognózy zbytkové životnosti (PREDIKCE)

z hlediska časového omezení

- cyklická (periodická)
- trvalá (monitorování)
- na objednávku uživatele

z hlediska využití měřeného diagnostického parametru

- jednoparametrická (jeden diagnostický parametr jedné diagnostické metody)
- multiparametrická alternativní (několik diagnostických parametrů z jedné diagnostické metody)

- multiparametrická (kombinace diagnostických parametrů různých diagnostických metod)

z hlediska nasazení v technickém životě

- k určování jakosti, resp. kvality provedené výroby, resp. opravy (před demontážní, meziperační, po konečné montáži apod. tzn. slouží k určení kvantifikace jakostního ukazatele,

- ke sledování provozní spolehlivosti (objektivizace kontrolně inspekční a revizní činnosti), tzn. sledujeme stav (resp. průběh) opotřebení sledovaného objektu, takže by nám jednoznačně mělo vyplynout, že TBD je především nástrojem objektivizace kontrolně inspekční a revizní činnosti (odborných prohlídek), kterou zjišťujeme míru opotřebení, resp. míru **provozní spolehlivosti** po stránce kvantifikace (vyčíslení). Ve zpětné vazbě řeší i další fáze technického života objektu, tzn. **V projektovanou spolehlivost** (projekce a konstrukce) a v přímé vazbě řeší i **inherentní spolehlivost** (výroba a montáž) jako ukazatel jakosti provedené práce.

Vlastní umístění snímačů pro účely monitorování stavu vibrací závisí především na daném objektu a na vibrodiagnostických parametrech, které mají být měřeny. Obecně lze říci, že se doporučuje umístění snímačů na ložiscích nebo blízko nich, cesta šíření signálu by měla být co nejkratší (bez přerušení či přechodů materiálu), hlavní osa snímače by měla směřovat na osu max. zatížení nebo ležet v oblasti zatížení (tzv. emisní okénko tj. $\pm 20^\circ$ od max. zatížení) atd. Jsou-li pro daný typ stroje k dispozici zkušenosti, tak umístění snímačů se řídí následujícími základními obecnými zásadami: [1]

umístění v místech s nejpravděpodobnějšími max. hodnotami vibrací (např. uprostřed rozpětí hřídele apod.),

umístění v místech, kde je malá vůle mezi stojící a rotující částí, je tedy předpoklad přidírání,

umístění v místech, kde se dá předpokládat včasná indikace opotřebení a poškození.

5.4 Základní metody vibrační diagnostiky

Vibrace strojních zařízení a následně vyzařovaný hluk jsou obecně buzeny zevnějšku kinematicky nebo sílově, jsou také samobuzeny změnou parametrů apod. Pravidelnost buzení a jeho intenzita je dána technickým stavem zařízení a jeho stupněm opotřebení. Nosičem informace o některém signálu pak může být modulační signál s nízkým frekvenčním rozsahem ve srovnání s frekvencí nosné složky, harmonické složky základního signálu apod. Hlavním nástrojem vibrodiagnostiky je frekvenční analýza.[1]

5.4.1 Frekvenční analýza pomocí FFT

Frekvenční analýza vibračních signálů pomocí FFT je základní a nejběžnější analytická metoda, která v průběhu vibračního signálu hledá periodické děje, které potom v daném souřadném systému zobrazí. Použijeme-li souřadný systém amplituda (osa y) a frekvence (osa x) mluvíme o frekvenčním spektru a při souřadném systému amplituda (osa y) a čas (osa x), tak mluvíme o časovém průběhu. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány, analyzovány a zobrazovány ve formě tabulek a grafů pomocí zařízení pro monitorování stavu vibrací - frekvenčního analyzátoru vibrací. [1]

Frekvenční spektrum časového signálu je tedy zobrazení v souřadnicích amplituda – frekvence. Z hlediska přenášené energie jsou časový průběh a frekvenční spektrum rovnocenné. U strojů s periodickým pracovním cyklem je vibrační signál způsoben těmito periodickými ději a frekvenční rozklad je tedy rozklad na množství sinusových signálů s příslušnou amplitudou a počáteční fází, který dává diagnostikovi významný nástroj pro identifikaci technického stavu a příčin jeho případného zhoršení přiřazením jednotlivých zdrojů budícím frekvencím ve spektru vibrací. Nejrozšířenějším způsobem stanovení frekvenčního spektra je u současných analyzátorů rychlá Fourierova transformace (FFT) a to pro svoji: [1]

- přesnost
- rychlost
- srozumitelné nastavení parametrů
- realizovatelnost ve formě univerzálního elektronického obvodu.

Procesor lze rozdělit na dvě části : paměť pro sejmutí digitalizovaného časového průběhu a matematické jednotky pro výpočet frekvenčního spektra, což z pohledu vlastního měřicího přístroje, resp. analyzátoru vibrací je označováno jako datakolektor (sběrač dat), který je zároveň analyzátozem, tzn. je vybaven vyhodnocovacím software.

Mluvíme-li o měření vibrací, tak vlastně mluvíme o vyjádření amplitudy sinusového signálu, takže pro měření celkových vibrací se používají následující vyjádření.

-Špička (peak) – vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní [1]

-Špička – špička (peak – to – peak, někdy také rozkmit) je vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny (2 x špička) [1]

-Průměrná hodnota (Average), jelikož většina průběhů nemá ideální sinusový průběh, tak je průměrná hodnota nenulová (0,637 x špička) [1]

-Efektivní hodnota (RMS – root mean square value). Je odvozena matematickou cestou (FFT – druhá odmocnina čtverců okamžitých hodnot), jinak při porovnání energie nebo výkonu stejnosměrného a střídavého proudu. (0,707 x špička u ideální sinusové křivky). Jedná se o nejčastěji vyjádření.[1]

Vlastní zobrazení frekvenčního spektra má různé formy. Ve vlastní měřicí praxi pak mluvíme nejen o zobrazení frekvenčního spektra, časovém průběhu vibrací, ale také možnosti překrývání frekvenčních spekter, kaskádovém zobrazení frekvenčních spekter apod., což je dáno softwarovým komfortem a samozřejmě vychází z požadavků provozního nasazení a nutnosti interpretace naměřených dat. [1]

Pro určení objektivního technického stavu diagnostikovaného objektu, při frekvenční analýze vždy rotujícího objektu, je nutný následující postup

Výpočet frekvencí zdrojů buzení – určení rotorových, zubových, ložiskových, lopatkových apod. frekvencí. Pro výpočet těchto budících frekvencí je nutná znalost kinematického schématu objektu a celá řada technických údajů (počty zubů, otáčky, počty lopatek apod.) a pro podrobnou analýzu např. vnitřní rozměry valivých ložisek, počty rotorových tyčí apod., které ne vždy jsou běžně dostupné.

Zpracování metodiky měření, kterou lze shrnout do následujících bodů:

Volba snímače vibrací – univerzální použití v širokém frekvenčním rozsahu má – **akcelerometr** – kap. 5.1.

Určení měřících míst - volit co nejblíže ložisek, co nejméně přechodů atd. – 5.3 => přesně definované stálé místo.

Způsob uchycení snímače - cenově a kvalitativně nejvhodněji způsob je **lepená podložka** – kap. 5.1.

Volba měřících směrů – ideální je měření ve třech směrech (H – horizontální, V – vertikální, A – axiální), každopádně ve třech směrech provádět měření v okolí spojky (motor – převodovky) – kap. 5.3.

Volba časového okna a frekvenčního rozsahu měření – nejčastěji **Hanning** (není známa ani amplituda, ani frekvence složek signálu) a frekvenční rozsah, doporučuje se, aby pokrýval 0,2 násobek nejnižší otáčkové frekvence do 3,5 násobku nejvyšší sledované frekvence buzení a obecně nepřekročil 10 kHz, ale nejčastěji rozsah 0-1000 Hz a řešil otázku frekvenční lupy (ZOOM) – kap. 5.2.2.

Určení měřené veličiny – nejčastěji RMS (vef).

Určení měřícího přístroje a způsobu monitorování vibrací – tzn. rozhodnout o tom, zda nasadíme kontinuální, či periodický nebo kombinovaný způsob sledování diagnostikovaného objektu. Uvedené rozhodnutí nám dá odpověď na otázku, zda musíme použít:

- trvale instalované měřicí systémy (ON-LINE)

- částečně trvale instalované měřicí systémy (semitrvalé), resp. kombinace, tzn. snímače jsou instalovány trvale a sěr dat je prováděn periodicky

6. Vakuum

6.1 Základní pojmy a teorie vakua

Vakuum (z lat. *Vacuus* - prázdný) znamená prostor, v němž je tlak plynu nižší než při normálním atmosférickém tlaku. Často se stává, že lidé mají sklon nazývat tlak nižší než atmosférický jako tlak záporný. To je však omyl. Záporný tlak neexistuje, už jen nulový tlak je spíše hypotetickou situací, protože abychom ho dosáhli, museli bychom mít absolutně prázdný prostor bez jediné molekuly. Je prokázáno, že i ve vesmíru není dokonalé vakuum. Z praktických důvodů se vakuum definuje do několika stupňů. Tyto stupně jsou však jen orientační, nejsou nijak normované.

1. stupeň...nízké vakuum 10^{-1} až 10^{-2} Pa
2. stupeň...vysoké vakuum 10^{-2} až 10^{-7} Pa
3. stupeň...ultravysoké vakuum 10^{-7} až 10^{-10} Pa
4. stupeň...extrémně vysoké vakuum $< 10^{-10}$ Pa

Nejnižší hodnota vakua dosažená v laboratorních podmínkách na zemi činí okolo 10^{-11} Pa. Pro představu na měsíci je tlak okolo 10^{-9} Pa. V hlubším vesmíru tlak klesá až na hodnotu okolo 10^{-22} Pa.

6.2 Jednotky:

Základní jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Jeden Pascal je tlak, který vyvolá síla 1 newtonu rovnoměrně rozložená na ploše jednoho čtverečního metru. Avšak jen s touto jednotkou nevystačíme. Stejně tak jako je ve zvyku u hydraulických systémů používat místo jednotek *MPa* spíše jednotku *bar*, tak i ve vakuové technice se častěji setkáme s *mbary* nebo *torry*.

Torr (1 Torr = 1 mmHg) - jedna z nejstarších jednotek pro vyjádření tlaku, stále se však používá v USA a v Japonsku.

$$1 \text{ Torr} = 133.3 \text{ Pa}, 1 \text{ Pa} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ torr}$$

mbar – jednotka odvozená od jednotky bar, je často používá v Evropě, především v německy mluvících zemích.

$$1 \text{ millibar} = 100 \text{ Pa} = 0.75 \text{ Torr}$$

V rámci jednotek tlaku se můžeme setkat ještě s dalšími jednotkami, které se však ve vakuové technice nepoužívají.

Tab 2. Konverze jednotek tlaku:

	Pa	torr	atm	bar	psi
Pa	1	$7.5006 \cdot 10^{-3}$	$9.8692 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1.4504 \cdot 10^{-4}$
torr	133.322	1	$1.3158 \cdot 10^{-3}$	$1.3332 \cdot 10^{-3}$	$1.9337 \cdot 10^{-2}$
atm	$1.01325 \cdot 10^5$	760	1	1.01325	14.69595
bar	$1 \cdot 10^5$	750.06	0.98692	1	14.5038
psi	6894.76	51.715	0.068046	0.068948	1

Pro praktické a inženýrsko-technologické aplikace je vakuum prostor s tlakem nižším než tlak atmosférický (okolní).

Střední volná dráha molekul je průměrná vzdálenost, kterou molekula urazí v prostoru, aniž se srazí s jinou molekulou:

$$\lambda = \frac{RT}{p\sqrt{2\pi\sigma^2 N_A}} \quad [5]$$

Tzv. kolizní průměr molekuly σ pro některé plyny (v nm): H₂ – 0,275; He – 0,225; N₂ – 0,38; O₂ – 0,365; vzduch – 0,375; H₂O(g) – 0,47; CO₂ – 0,465; Ar – 0,36. K tomu, aby molekula mohla systém opustit nějakým otvorem, je nutné, aby její střední volná dráha byla menší než rozměry otvoru. Zde je nutné zdůraznit význam této veličiny pro konstrukci vakuových zařízení. Při teplotě 300 K a tlaku 10^{-1} Pa je střední volná dráha molekul vzduchu 6 cm, při tlaku 10^{-3} Pa se zvětšuje na 6 m a při tlaku, který panuje na povrchu Měsíce (10^{-9} Pa) je střední volná dráha 6000 km. Tím lze vysvětlit nutnost použití rozměrných aparatur při práci za nízkých tlaků.

Střední rychlost pohybu molekul je dána vztahem:

$$v = \sqrt{\frac{8kN_a T}{\pi M}} \quad [5]$$

Schopnost proudění plynu částmi vakuových systémů (otvory, spojovací potrubí) charakterizuje tzv. *vakuová vodivost* G . Například vakuová vodivost otvoru o ploše S_0 ve stěně o ploše S je dána vztahem

$$G = \frac{vS_0}{4\left(1 - \frac{S_0}{S}\right)} [5]$$

Dosadíme-li rychlost v v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a plochu v v m^2 , jednotka vakuové vodivosti bude $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ – tedy objem plynu, který projde otvorem za jednotku času. Pro *vakuovou vodivost válcového potrubí* o průměru d a délce l lze odvodit:

$$G = \frac{3,81d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}} [5]$$

Při těchto výpočtech je nutné brát v úvahu charakter proudění plynu v systému, tj. jedná-li se o viskózní tok plynu ($\lambda < d/200$, molekuly plynu mění směr pohybu z důvodu srážek mezi sebou) či molekulární tok ($\lambda \geq d$, molekuly mění směr pohybu z důvodu srážek s se stěnou potrubí). V případě, že čerpaný plyn bude vzduch při laboratorní teplotě ($M = 28,96 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, $T = 298 \text{ K}$), lze vakuovou vodivost potrubí odhadnout dle následujících vzorců. Rozměry potrubí d a l zde dosazujeme v cm a vakuovou vodivost G vypočteme v $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$\text{pro viskózní tok: } G \approx 10 \frac{d^4}{l}$$

$$\text{pro molekulární tok: } G \approx 10 \frac{d^3}{l}$$

6.3 Získávání vakua

Prostředkem k získávání vakua je vývěva, kterou lze v zásadě považovat za otvor o ploše S do prostoru s nižším tlakem. Připojíme-li nějaký systém s tlakem p_1 k jinému systému, kde je vakuum charakterizované tlakem p_2 , začnou otvorem mezi oběma systémy proudit molekuly oběma směry. Počet molekul vytékajících ze systému do vývěvy je dán

rozdílem $N_1 - N_2$.

$$N_1 - N_2 = S(p_1 - p_2) \sqrt{\frac{N_a}{2\pi kMT}} [5]$$

Další veličinou charakterizující vývěvu je *čerpací rychlost* S_p (v l.s^{-1}), která je vyjádřena následující rovnicí.

$$S_p = 3,64S(p_1 - p_2)\sqrt{\frac{T}{M}} [5]$$

Čerpací rychlost je tedy funkcí tlaku v systému (tzv. čerpací charakteristika) a p_2 je tzv. *mezní, tedy nejnižší tlak*, kterého je vývěva schopna dosáhnout. Kvalitní a účinná vývěva tedy musí mít velký vstupní otvor a nízký mezní tlak. Stav systému je popsán stavovou rovnicí, která je vztahem mezi teplotou T , tlakem p , objemem V a látkovým množstvím n . Obecně platné termodynamické principy lze zapsat

v diferenciálním tvaru.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{V,n} > 0 \qquad \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T,n} \leq 0 \qquad \left(\frac{\partial p}{\partial N}\right)_{T,p} \geq 0$$

Z uvedených rovnic plyne, že tlak systému může být snížen jedním nebo kombinací několika z následujících postupů:

1. snížením teploty systému při konstantním objemu systému a konstantním látkovém množství v něm,
2. zvýšením objemu systému při konstantní teplotě a konstantním počtu molů
3. snížením látkového množství v systému za konstantní teploty a objemu.

Tyto tři postupy mohou být kombinovány (postupně) nebo použity současně.

Zároveň je možné postupy obrátit k dosažení opačného efektu, tj.

ke zvýšení tlaku systému.

6.4 Typy vývěv

Vývěvy lze rozlišit podle způsobu, jakým dosahují snížení tlaku na vývěvy transportní a adsorpční. Transportní vývěvy odčerpávají z evakuovaného prostoru molekuly plynu, které procházejí vývěvou, zatímco vývěvy adsorpční tyto molekuly zachycují uvnitř

vývěvy. Už jen z tohoto základního rozdělení je patrné, že vývěvy transportní mohou pracovat kontinuálně na rozdíl od vývěv adsorpčních, které obvykle pracují v cyklech. Transportní vývěvy se dále dělí na mechanické a hybnostní. Mechanické vývěvy dosahují snižování tlaku cyklickou změnou objemu ve vývěvě, hybnostní vývěvy předávají molekulám čerpaného plynu rychlostní impuls ve směru čerpání plynu.[5]

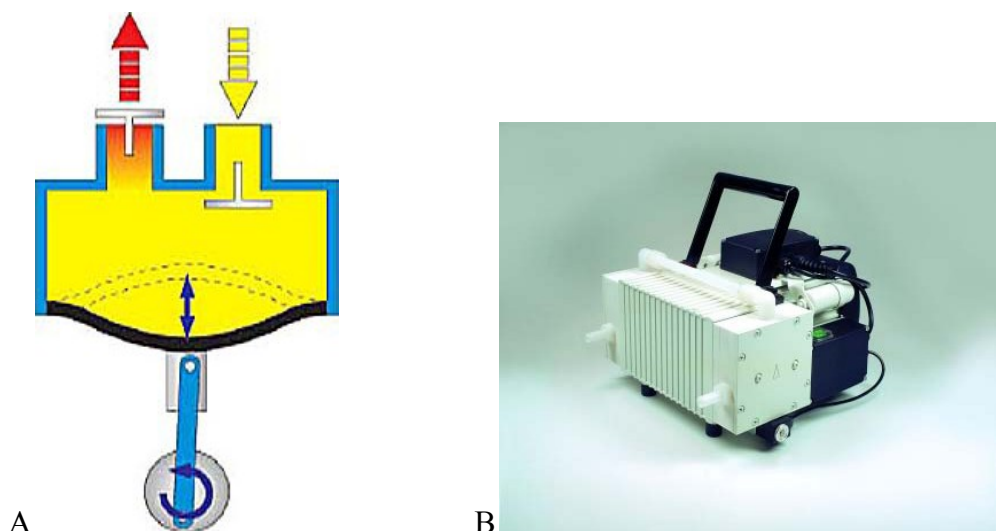
Tabulka 3: Rozdělení vývěv podle způsobu jakým snižují tlak.

vývěvy	adsorpční	kryokondenzační, kryosorpční, getrová		
	transportní	mechanické	pístové	membránová, Sprenglerova, Toeplerova
			rotační	rotační olejová, rotační rtuťová, Rootsova
		hybnostní	vodní, difúzní, molekulární, iontová	

6.4.1 Vývěvy mechanické

Vývěvy pístové

Mechanická pístová vývěva pracuje na principu cyklického zvětšování objemu pohybem pístu v těsném válci (Sprenglerova vývěva). Píst může být tvořen i rtuťovým sloupcem jako například ve vývěvě Toeplerově. Pístové vývěvy s touto konstrukcí mají malou účinnost, pro svůj relativně velký mrtvý (nevyčerpatelný) objem a v současnosti se téměř nepoužívají. Moderní variantou pístové vývěvy je vývěva membránová, která je dosti rozšířená v laboratořích a provozech kde je třeba dosahovat nízkého vakua, řádově 10^2 Pa. Mezní tlak je limitován tlakem při jakém ještě dojde k otevření vstupního ventilu do vývěvy. Často bývají tyto vývěvy používány jako jednotky pro vytvoření předvakua v hybridních vakuových jednotkách (např. spojení membránové a Rootsovy vývěvy). V případě že je jako píst použita membrána z chemicky inertního materiálu (Teflon), jsou tyto vývěvy vhodné i pro čerpání agresivních či korozivních plynů. Schéma membránové vývěvy je znázorněno na obrázku 1A. Tyto vývěvy mohou být zapojovány sériově (pro dosažení nižšího mezního tlaku) či paralelně (pro zvýšení čerpací rychlosti). Nevýhodou je časté opotřebení vstupních a výstupních ventilů vývěvy, jejichž kvalita provedení a těsnost jsou pro funkci vývěvy zcela klíčové. Výhodou je relativně nízká cena zařízení.[5]

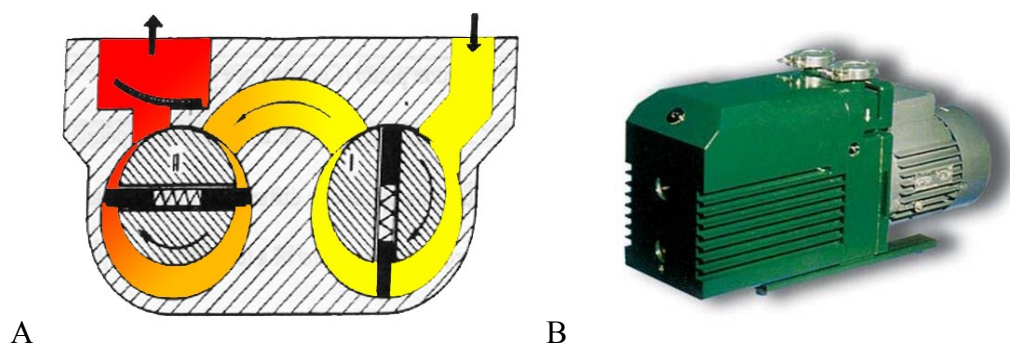


Obrázek 12. A: Schéma membránové vývěvy, **B:** fotografie dvoukomorové membránové vývěvy.

Vývěvy rotační

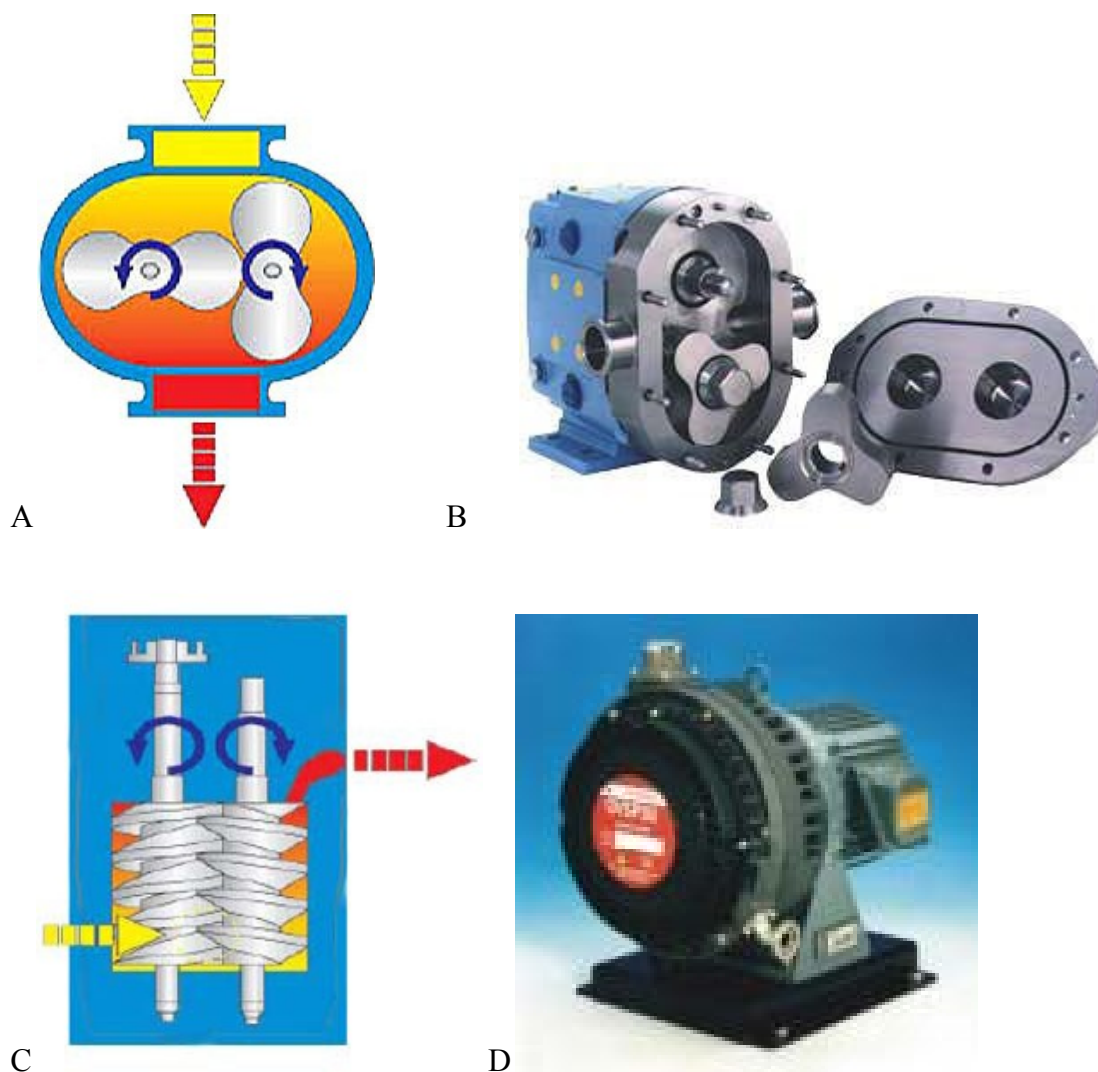
V laboratorní i technologické praxi jsou nejpoužívanější rotační olejové vývěvy. Ty pracují na základě excentricky uloženého rotoru s lopatkami. Olej zde hraje úlohu těsnící, slouží jako mazivo a do jisté míry i zajišťuje i přenos tepla uvolňovaného při stlačování plynu. Ve vývěvě dochází ke kompresi čerpaného plynu, což může mít za následek rozpouštění některých odčerpávaných látek (např. vodní páry) v oleji a jejich případný návrat do čerpaného systému. Kde je toto nežádoucí, používá se vývěv s proplachováním (tzv. gasballast), ovšem za cenu snížení účinnosti – mezního tlaku. Mezní tlak běžných olejových rotačních vývěv se pohybuje v rozmezí 3 až 0.02 Pa (150 – 1 Pa u vývěv s proplachováním), maximální čerpací rychlost je v rozmezí jednotek až stovek litrů plynu za sekundu. K dosažení větší čerpací účinnosti bývají vývěvy spojeny paralelně či sériově. Některé rotační vývěvy jsou konstruovány jako dvojstupňové, což v podstatě představuje dvě vývěvy vzájemně sériově propojené a konstrukčně uspořádané v jednom bloku na společné hřídeli. Účinnost olejové vývěvy ovlivňuje především kvalita použitého oleje, resp. tlak jeho nasycených par. Velkou nevýhodou olejových vývěv je možnost vniku oleje do čerpaného prostoru. Tyto nedostatky řeší rtuťové nebo suché vývěvy. Při použití těchto vývěv v laboratoři i v technologickém provozu je třeba zamezit vniknutí organických či korozivních látek do vývěvy, protože v takovém případě obvykle dochází k jejímu zadření, případně úplnému zničení. Stejně tak může

nastat situace, kdy se páry oleje z vývěvy při nízkých tlacích dostávají do evakuovaného prostoru. Proto obvykle bývají pro laboratorní použití mezi vývěvu a evakuovaný prostor zařazeny tzv. vymrazovací prsty, kde dochází ke kondenzaci a zachycení par z vývěvy i z evakuovaného prostoru. Rotační olejové vývěvy musí vždy být uloženy tak, aby z nich nemohl vytékat pracovní olej.[5]



Obrázek 13. A: Schéma dvoustupňové rotační olejové vývěvy, **B:** fotografie rotační olejové vývěvy.

Rootsovy vývěvy pracují na principu dmychadel nebo zubových čerpadel. Dva precizně vycentrované rotory s minimálními mezerami mezi sebou se otáčejí rychlostí několik tisíc otáček za minutu a přečerpávají plyn ze systému. Tyto velmi robustní vývěvy (nezřídka o váze i několika tun, často používané jako součást vzduchotechniky) vyžadují předvakuum (několik stovek Pa) a chlazení, mnohdy i odhlučnění. Jejich předností je velmi vysoká čerpací rychlost (až desítky tisíc l/min). Rotory mohou mít i tvar šroubovic či závitnic a stejně jako v předchozích případech mohou být tato zařízení sériově či paralelně zapojována. Protože tyto vývěvy n obsahují mazací oleje mohou být uloženy jakýmkoliv způsobem.[5]



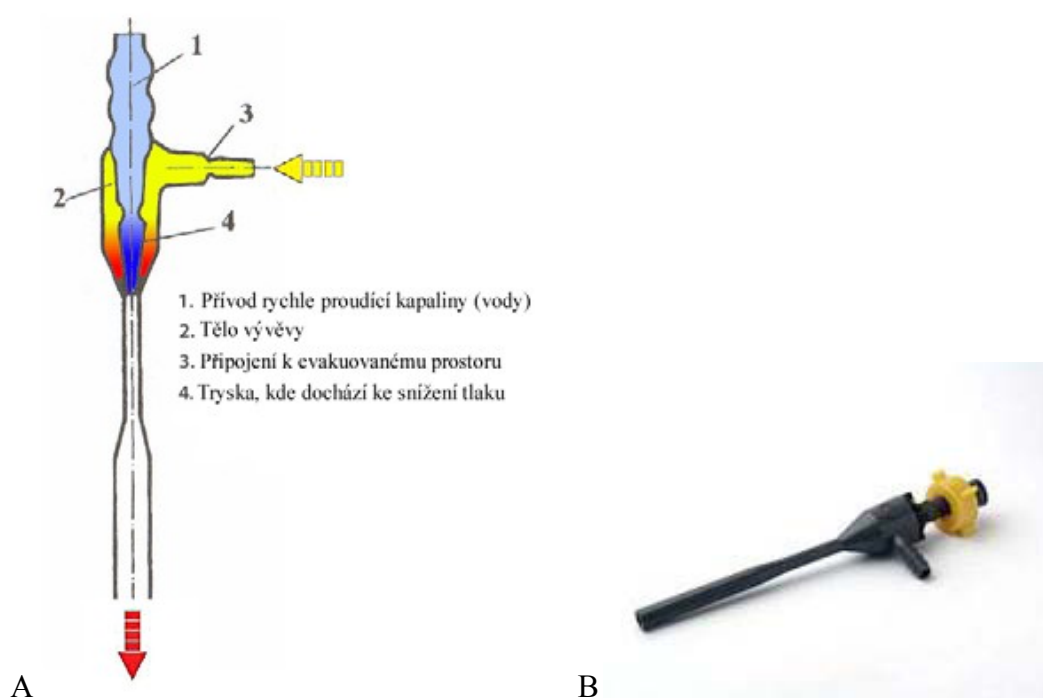
Obrázek 14. **A:** Schéma Rootsovy vývěvy, **B:** fotografie rozebrané Rootsovy (Lobeho) vývěvy, **C:** schéma vývěvy se šroubovicovými rotory, **D:** fotografie vývěvy se závitnicovým rotorem.

6.4.2 Vývěvy hybnostní

Kapalinová (vodní) vývěva

Vodní vývěva je reprezentantem skupiny vývěv s proudem pracovní tekutiny, kdy rychlý kuželový proud vody proudící z trysky strhává molekuly čerpaného plynu. Podle Bernoulliho rovnice je tlak v místě rychle proudící kapaliny nižší než v místě, kde kapalina proudí pomaleji, takže rozdíl tlaku nasává plyn z evakuovaného prostoru a směs kapaliny s plynem je odváděna z vývěvy. Fungování této vývěvy napomáhá i to, že proudící kapalina předává molekulám plynu hybnostní impuls ve směru čerpání plynu.

Malá laboratorní vodní vývěva dosahuje čerpací rychlosti několik desetin litrů/min a mezního tlaku několika kPa. Dobře konstruované vodní vývěvy jsou schopné dosáhnout mezního tlaku, který je roven tenzi vodní páry při dané teplotě vody (např. 1,7 kPa při 15°C). Pro dosažení nižšího tlaku je třeba použít kapalinu s nižší tenzí par (obvykle silikonové oleje s nízkou viskozitou). Vývěva je levná a konstrukčně velmi jednoduchá (viz obr. 4), proto je rozšířená zejména v laboratořích, její nevýhodou je značná spotřeba vody.[5]



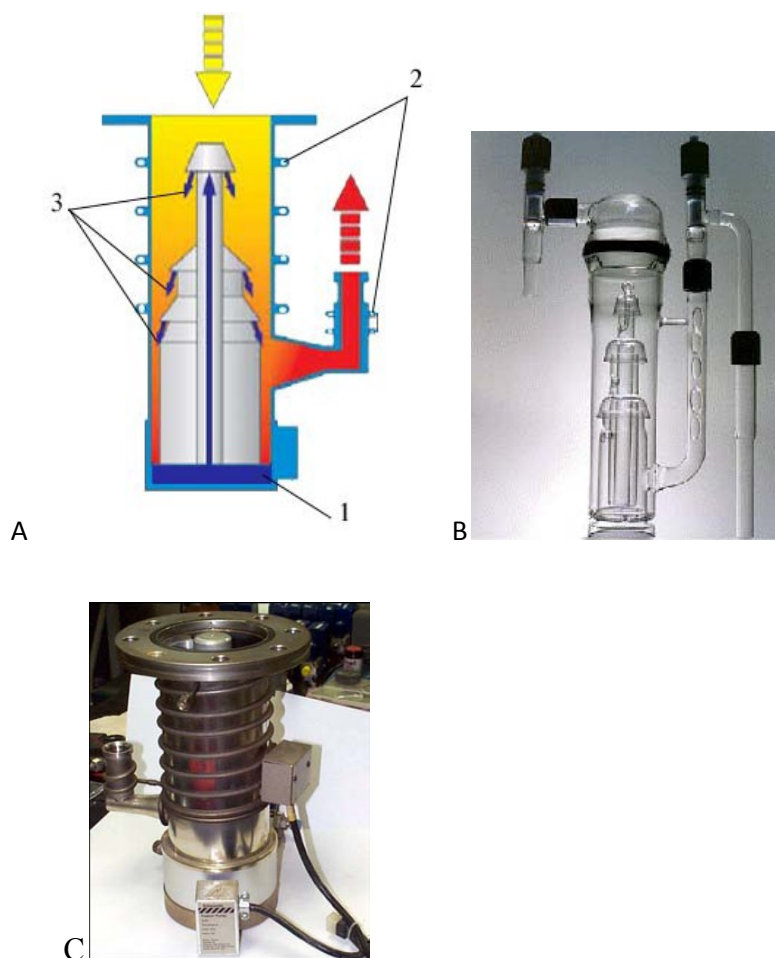
Obrázek 15. A: Schéma vodní vývěvy, **B:** fotografie plastové vodní vývěvy s převlečnou

maticí pro připojení na vodovod.

Vývěva difúzní

V technice vysokého vakua se uplatňují velice často difúzní vývěvy. Ty vyžadují předvakuum v řádech jednotek až desítek Pa (tj. jejich výstup je připojen na vstup primární vývěvy, většinou rotační olejové). Difúzní vývěva nemá žádné pohyblivé části a funguje podobně jako kapalinová vývěva, v oblasti vyššího vakua však působí pouze

strhávání molekul plynu rychle proudící kapalinou nebo parou. Dosažitelné vakuum je omezeno povrchovým napětím čerpací kapaliny nebo par, proto se dříve používala rtuť, dnes většinou olejové páry. Difúzní vývěva sestává z varné části (**1**, viz schéma 5A), kde se elektrickým proudem zahřívá k varu pracovní tekutina (olej nebo rtuť) a její páry jsou vedeny tryskou do prostoru vývěvy (**3**). Směr proudění těchto par je shodný se směrem proudění čerpaného plynu. Čerpaný plyn difunduje do par pracovní tekutiny a tato směs je pak vedena do prostoru, kde zkondenzuje pouze pracovní tekutina (a stéká zpět do varné části) a čerpaný plyn je odveden primární vývěvou ze systému. Pro správnou funkci je nutno plášť vývěvy, po jehož vnitřní straně stéká zkondenzovaná pracovní tekutina, účinně chladit, obvykle vodou (**2**). Mezní tlak olejových difúzních vývěv se pohybuje v rozmezí 10^{-2} až 10^{-7} Pa (závisí na kvalitě a typu oleje), u rtuťových vývěv je to přibližně 10^{-5} Pa. Vzhledem k velké jedovatosti rtuti se dnes používají téměř výhradně olejové náplně, které jsou tvořeny silikonovými oleji či polyfenylethery s teplotou varu cca 180°C , při tlaku 10^{-3} Pa (např. Dow Corning 705, Santovac 5 aj.). Tyto oleje jsou chemicky i tepelně velmi stabilní a proto jsou používány v laboratořích i v technologických provozech. Čerpací rychlost difúzních vývěv je relativně nízká a pro dosažení mezního tlaku v evakuovaném prostoru je nutné odčerpávat plyn velmi dlouho (i desítky hodin). Čerpací rychlost je vyšší u difúzních vývěv s velkým průměrem těla vývěvy. Výhodou těchto vývěv je relativně nízká cena, konstrukční jednoduchost, odolnost a v neposlední řadě i schopnost čerpat jakýkoliv plyn. Nevýhodou je možné znečištění vakua parami pracovní tekutiny a proto je nutné mezi evakuovaný prostor a difúzní vývěvu zařazovat vymrazovací prsty a lapače oleje. Mají také poměrně dlouhou dobu náběhu (před spuštěním je nutno zahřát náplň na pracovní teplotu cca 200°C) i dlouhou dobu odstavení. Musejí být vždy umístěny vertikálně a je nutno zamezit vniknutí vzduchu do vývěvy během čerpání, protože hrozí znehodnocení pracovní tekutiny účinkem kyslíku za vysoké teploty.[5]

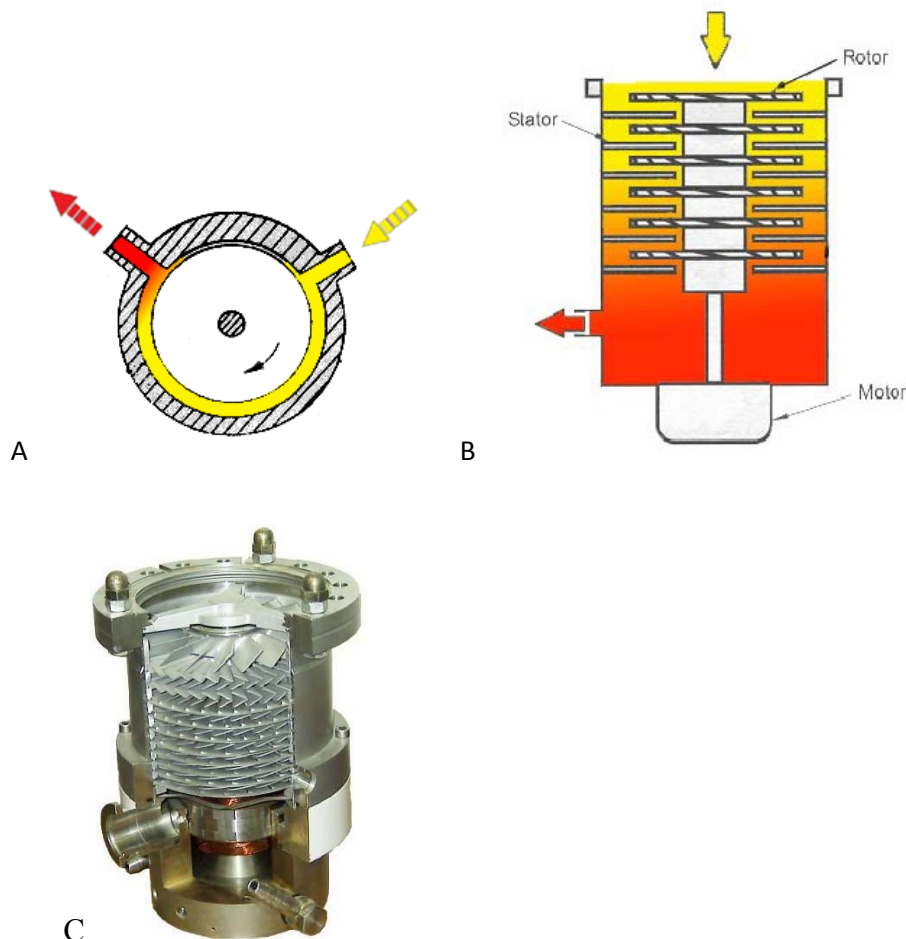


Obrázek 16. A: Schéma difúzní vývěvy, B: skleněná difúzní vývěva chlazená vzduchem, C: fotografie kovové difúzní vývěvy chlazené vodou.

Molekulární (turbomolekulární) pumpa

Tato pumpa je podobná svou konstrukcí rotační olejové pumpě, ale asymetricky umístěný rotor nemá žádné planžety a molekuly zbytkové atmosféry strhává pouze nerovnostmi na svém povrchu. Otáčky této pumpy jsou velmi vysoké (16-20 tisíc otáček za minutu) a vyžadují dokonale vyvážený rotor a uložení hřídele v magnetické levitaci. Schéma této pumpy je znázorněno na obrázku 6A. Turbomolekulární pumpa pracuje na stejném principu, jen s tím rozdílem, že molekuly plynu jsou odráženy ve směru čerpání pomocí rotoru s lopatkami. Tento typ vývěvy je velmi náročný na výrobu a tudíž drahý, ale dokáže čerpat od velmi nízkého vakua až do tlaku 10^{-11} Pa (turbomolekulární pumpa), vakuum je velmi čisté. Molekulární vývěva nemůže pracovat při atmosférickém tlaku, protože lopatky rotoru by se silným třením o čerpaný plyn zahřály a zničily, proto je používána v kombinaci s primární vývěvou (např. olejová rotační). Pumpa se přesto

velice rozšířila a je dnes součástí celé řady spektroskopických zařízení, elektronových mikroskopů a urychlovačů částic (např. Large Hadron Collider v CERNu) v průmyslu se využívá spíše výjimečně k evakuování velkých obrazovek a rentgenových lamp.[5]

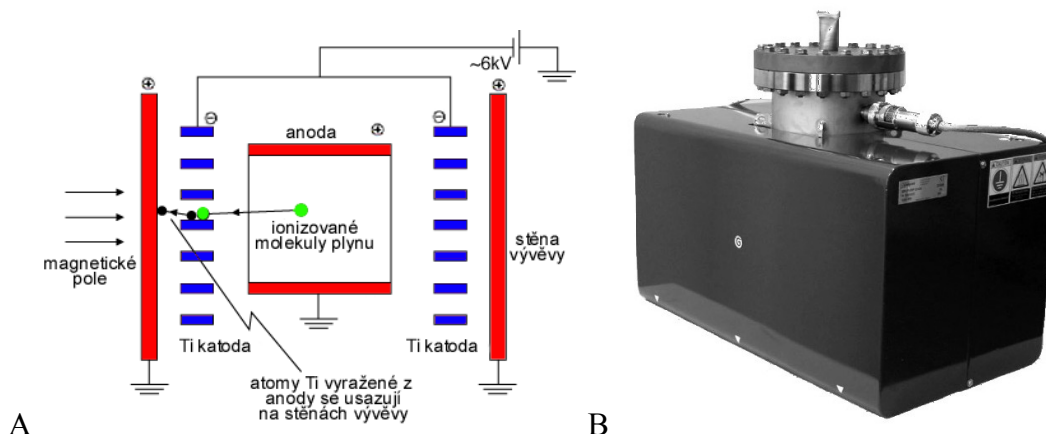


Obrázek 17. A: Schéma molekulární vývěvy, **B:** schéma turbomolekulární vývěvy, **C:** řez turbomolekulární vývěvou.

Iontová vývěva

Iontové vývěvy v sobě spojují princip hybnostních vývěv (molekulám plynu je udílen impuls ve směru čerpání proudem nabitých částic) s principem vývěv adsorpčních (molekuly plynu jsou poutány ve vývěvě). Na schématu 7A je znázorněna funkce iontové vývěvy tvořené dvěma katodami a trubicovou anodou. Na anodu se vloží napětí několik kV, takže vznikne výboj, který rozprašuje materiál elektrod na okolní stěny. Výboj probíhá v magnetickém poli permanentního magnetu, které je kolmé k rovině elektrod a proto se elektrony pohybují na dlouhých šroubovicových drahách, což zvyšuje

pravděpodobnost jejich srážky s molekulami čerpaného plynu. Ten je při srážce ionizován a vzniklé ionty jsou strhávány směrem ke katodám, kde se adsorbují na povrchu titanu. Účinnost vývěvy je dále zvyšována tím, že titan je rozprašován a zachycuje se na ostatních částech vývěvy, kde na sebe váže zbytky čerpaných plynů. Iontová pumpa pracuje v cyklech. Lze dosáhnout tlaku 10^{-9} až 10^{-10} Pa. Nevýhodou je vysoká cena, vysoký elektrický příkon, velká hmotnost, nižší čerpací rychlost a nutnost obnovování elektrod. Vyšší čerpací rychlosti lze dosáhnout zvýšením plochy elektrod, vyšším napětím či použitím dalších pomocných elektrod. Tyto vývěvy se používají pro získání ultravysokého vakua ve speciálních přístrojích, jako například v hmotnostních spektrometrech, urychlovačích, mikrovlnných generátorech či elektronových mikroskopech.[5]



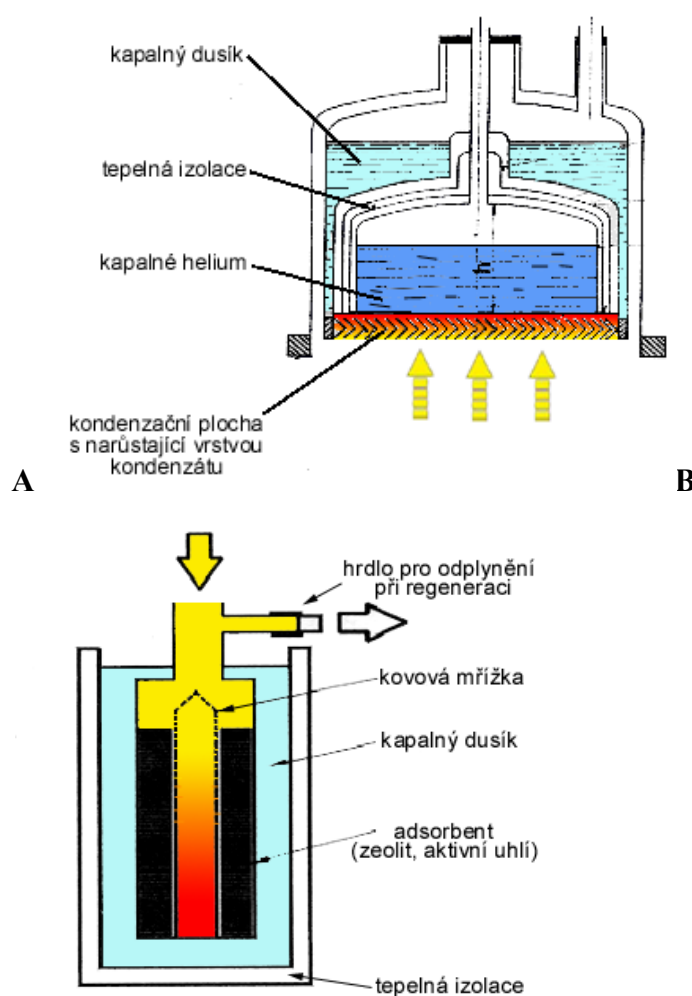
Obrázek 18. A: Schéma iontové vývěvy, **B:** fotografie iontové vývěvy.

6.4.3 Vývěvy adsorpční

Kryokondenzační a kryosorpční vývěvy

Kryokondenzační vývěva je obvykle tvořena dvěma izolovanými nádobami obsahujícími kapalný dusík a kapalně helium. Vnější nádoba se plní kapalným dusíkem a tepelně izoluje vnitřní nádobu s drahým kapalným heliem, která je spojena s kondenzační plochou, zasahující přímo do evakuovaného prostoru. Na této chladné ploše kondenzují molekuly zbytkového plynu a tlak ve vývěvě klesá. Protože na kondenzační ploše narůstá vrstva tuhého kondenzátu, který má špatnou tepelnou vodivost, účinnost vývěvy

se během čerpacího cyklu postupně snižuje. Po skončení se vývěva musí odstavit, ohřát a kondenzační plocha se desorbuje. Pro zvýšení účinku se namísto hladké kondenzační plochy chladí materiál schopný absorbovat plyn ve svých dutinách (zeolity nebo aktivní uhlí), což je principem vývěvy kryosorpční. Tyto vývěvy jsou konstrukčně velmi jednoduché, mají velkou čerpací rychlost, poskytují čisté vakuum a lze s nimi dosahovat tlaků 10^{-7} Pa (vývěvy chlazené pouze kapalným dusíkem) i tlaků nižších než 10^{-10} Pa (vývěvy s průtokem kapalného helia).[5]

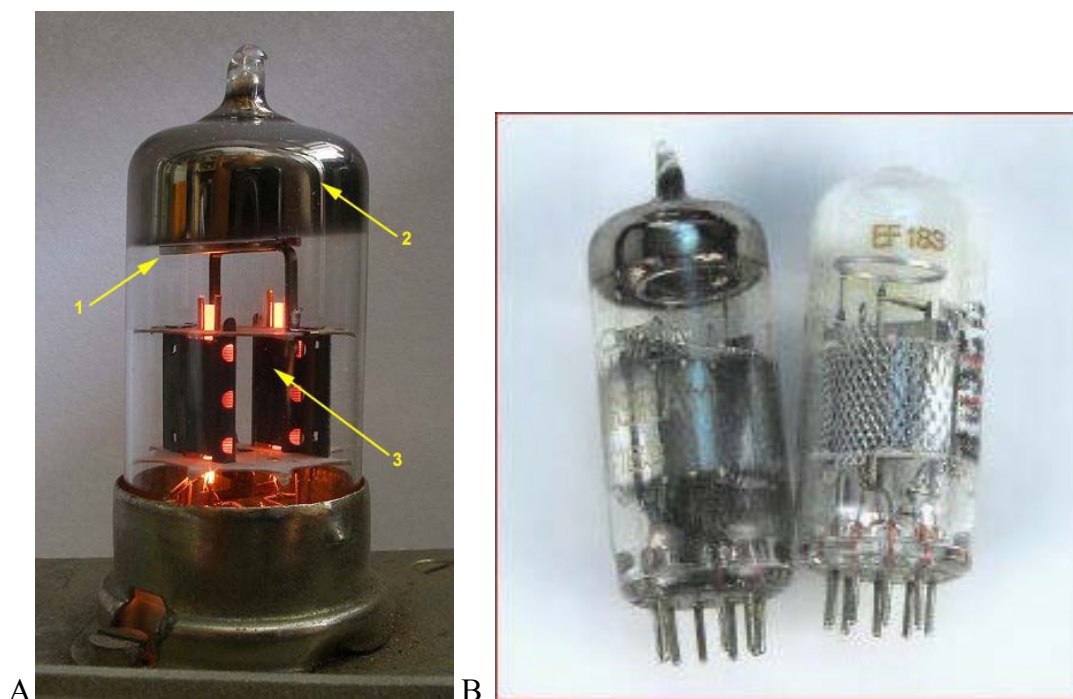


C

Obrázek 19. A: Schéma kryokondenzační vývěvy CERN, B: schéma kryosorpční vývěvy,

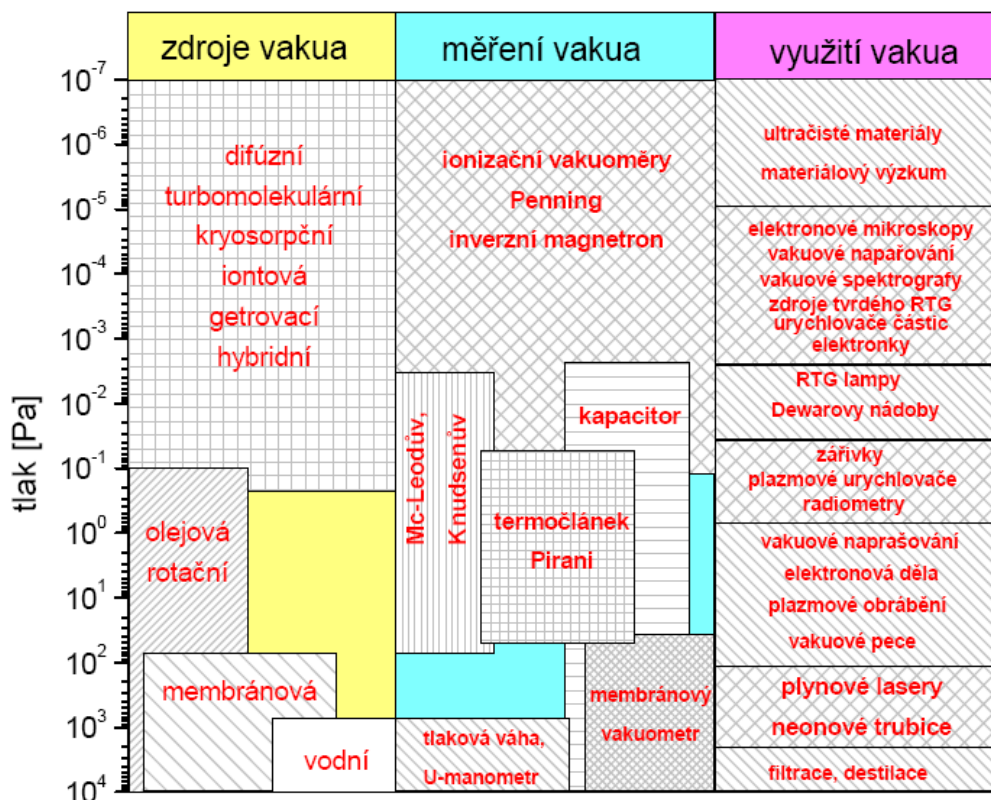
Getrová vývěva

Getr (z angl. getter) je látka, která se přidává do vakuových zařízení, zejména elektronka osvětlovacích trubíc, pro svoji schopnost reagovat se zbytky plynu, jež nebyly zcela odsáty vývěvou. Zlepšuje tak vakuum nebo čistotu plynu v evakuovaném prostoru. Indukčním ohřevem se ve vakuu odpaří getrovací látka, obvykle baryum a pohltí v okamžiku odpaření zbytky plynů, které nestačila odsát vývěva. Getrové páry jsou v činnosti jen po několik vteřin pak se srážejí na baňce v tuhém skupenství jako známé getrové zrcátko, jejich účinek je však mimořádně významný a důležitý. Pro rozměrná skleněná zařízení (např. obrazovky) se používají i jiné getrovací látky jako je například hliník, hořčík, vápník, sodík, stroncium, cesium nebo fosfor. V případě, že dojde k poškození trubice, getrové zrcátko rychle reaguje se vzduchem za vzniku bílých oxidů. Tak je možné snadno rozpoznat nefunkční elektronku od elektronky neporušené. V zařízeních, která musí být zavzdušněna a poté opět evakuována (např. kvůli údržbě), se jako getr používají velmi tenké destičky slitiny zirkonia (cca 70%) s dalšími kovy (V, Fe, Co, Al nebo lanthanoidy). Při kontaktu se vzduchem tato slitina na povrchu vytvoří vrstvu oxidu, která ji pasivuje. Při zahřátí se vrstva rozruší a opět se obnaží aktivní getrovací materiál.[5]



Obrázek 20. A: Dvojitá trioda v provozu: 1...kroužek s getrovací látkou (Ba), 2...getrové zrcátko, 3...vlastní elektronka. **B:** Ukázka pentody EF 183 (vlevo dobrá, vpravo špatná – do baňky vnikl vzduch)

6.5 Využití vakuové techniky v technologii a průmyslu



Obrázek 21. Zdroje, měření a využití vakua podle tlaku.

Vakuová technika pronikla téměř do všech odvětví lidské činnosti a denně se můžeme potkávat s výrobky a zařízeními, která jsou nějakým způsobem spojena s využitím vakua. Na závěr tohoto učebního textu jsou uvedena jednotlivá průmyslová odvětví s příklady procesů využívajících vakuum. Tlak, za jakého je uvedený proces realizován, je možné odhadnout z diagramu na obrázku 22. Výběr zdroje vakua vhodného pro technologickou operaci se řídí několika kritérii:

1. mezní tlak vývěvy
2. cena
3. množství plynů odsávaných do vývěvy, tj. čerpací rychlost
4. vlastnosti plynů, jež jsou vývěvou odsávány (korozivní plyny apod.)

Tak například pro vakuové naprašování a napařování těkavých kovů (např. Al, Ba) postačuje dvoustupňová rotační vývěva, pro stejnou operaci s méně těkavými kovy

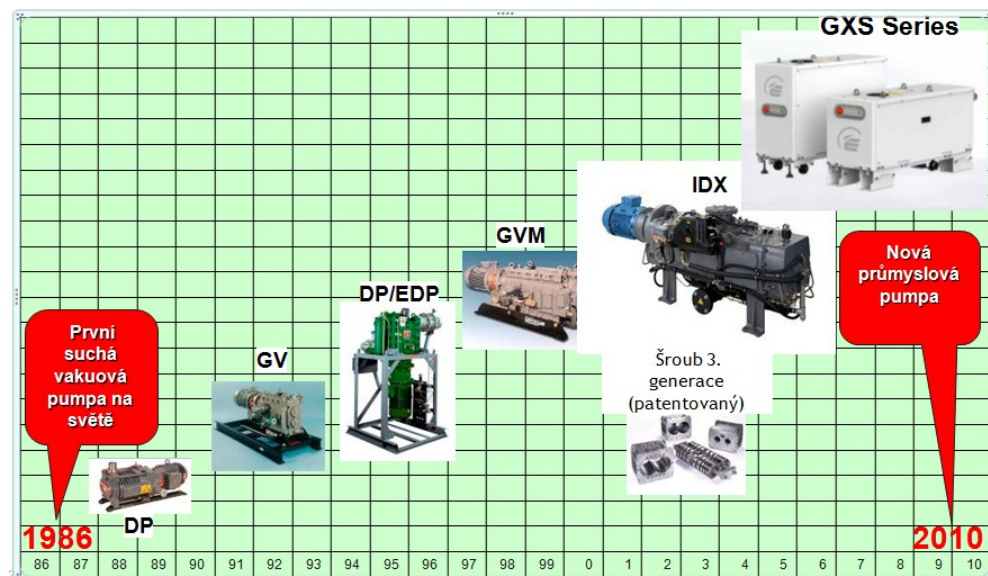
(např. Ti) je nutné použít vývěvu difúzní či hybridní. V automatizovaných linkách se v současné době hojně využívají podtlakové přísavky pro uchopení a manipulaci s různými předměty jako jsou plechy, skleněné tabule ale i betonové dílce, plastové výrobky a další. Vakuová přísavka má relativně malý objem, ale je třeba v ní vytvořit dostatečný podtlak, aby se předmět neuvolnil během manipulace. Zde se nejvíce používají rotační olejové vývěvy, které vytvoří dostatečný podtlak a nejsou příliš náchylné na případně znečištění prachovými částicemi. V živočišné výrobě se vývěvy používají například v automatizovaných dojících linkách skotu. Zde je třeba použít vývěvu s dostatečnou čerpací rychlostí, avšak tlak v dojících přísavkách nesmí být příliš velký, aby nedošlo k poranění zvířete. Dříve byly používány vodní vývěvy, avšak vzhledem k velké spotřebě vody jsou z ekonomických důvodů nahrazovány membránovými a Rootsovými vývěvami v kombinaci s regulátory vakua [5]

Tabulka.4 Přehled využití vakua v technologických procesech

Průmyslové odvětví	Obor	Aplikace	Technologický postup
Elektronika	součástky	elektronky, obrazovky integrovane obvody	evakuace, getrování, kontrola těsnosti, zátavy vakuové napařování a naprašování kovových i nekovových vrstev
		kondenzátory	vakuové napařování a naprašování kovu na papír a plastické fólie
		tranzistory, LED	vakuová výroba polovodičových vrstev (dopování, napařování)
		rezistory	vakuové napařování a naprašování odporových vrstev
	datová média	oscilační krystaly CD, CD-ROM, DVD	vakuové napařování a naprašování kovových vrstev vakuové napařování kovových vrstev na plasty
Elektrotechnika	světelné zdroje	žárovky, výbojky zářivky	evakuace, getrování, vakuové plnění, odplyňování, pokovování, kontrola těsnosti, zátavy
	vinutí	transformátory, motory, tlumivky	lakování vinutí za horka ve vakuu
Hutnictví	vakuová metalurgie	speciální materiály	vakuové tavení, slinování, pájení, žhání, kalení, sváření, odlévání, rafinace kovů
Optika	přístroje	čočky, hranoly, filtry, zrcadla	vakuové pokovování
	spotřební keramika, sklo, bižuterie	dekorativní povrchové vrstvy	vakuové napařování a naprašování kovových i nekovových vrstev
Chemie	vakuové čištění	monokrystaly, vysoce čisté látky	sublimace, zonální tavba, destilace
		vrstvy polymerů	polymerace monomerů ve vakuu
	plasty	lisování plastů	liti a lisování plastů ve vakuu
Potravinářství	potraviny	masné, mléčné výrobky	vakuová sterilace, konzervace, balení
Zemědělství	produkty	obilí, semena	evakuace, balení, sušení
	živočišná výroba	dojení, ošetřování skotu	automatizované vakuové dojící systémy, ošetřování skotu (vakuové myčky struků)
Ostatní		plnění porézních materiálů	Vakuové plnění porézních materiálů například olejem (kluzná ložiska)
		porézní materiály nasáté vodou	vakuové a sublimační sušení
		automatizované montážní linky	uchopovací podtlakové přísavky

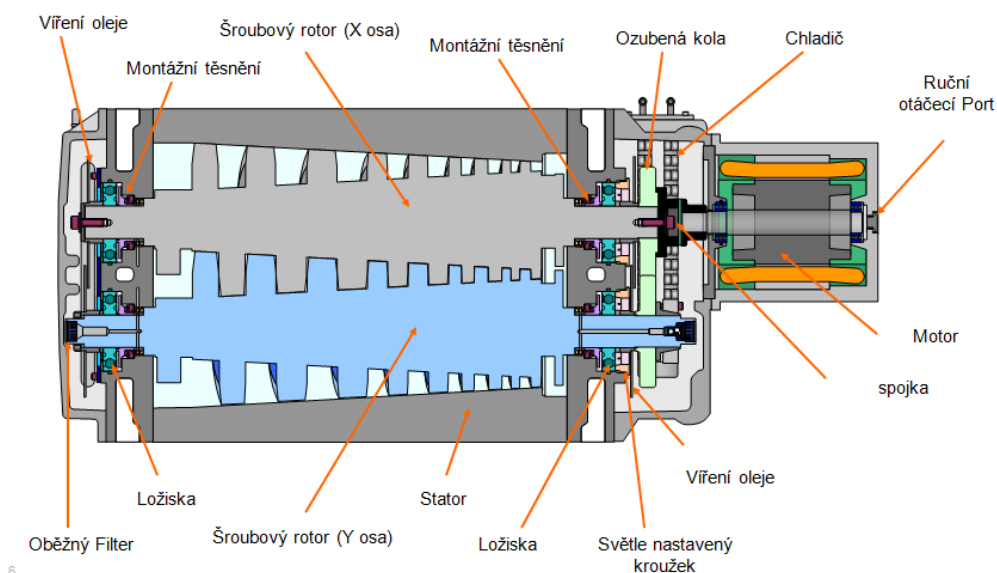
7 Průmyslová suchá vakuová pumpa Typu GXS

7.1 První zmínky o suché vakuové pumpě je roku 1986 viz Obr.22



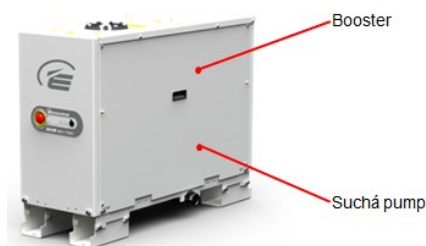
Obr. 22 Vývoj suchých vakuových pump

7.2 Konstrukční provedení vakuové pumpy



Obr. 23 Konstrukční řez a popis vakuové pumpy

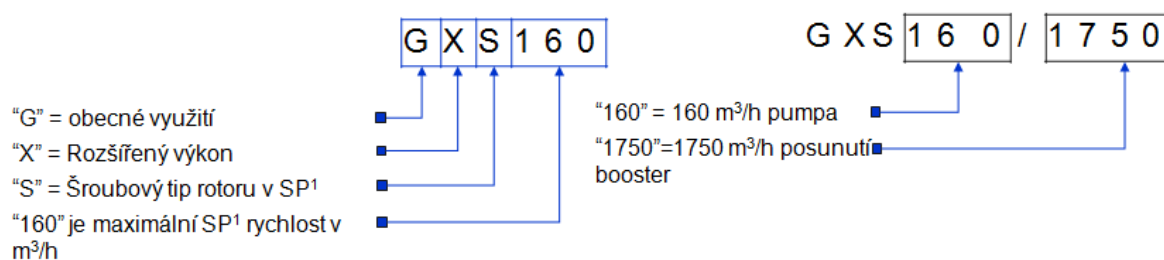
7.3 Typy a systémové označení GXS



Samotná puma	Pumpa/Booster	
	GXB1750	GXB2600
GXS160	GXS160/1750	
GXS250		GXS250/2600

Obr.24. VakuováPumpa GXS160/1750

**Samostatná pumpa a pumpa/booster jsou k dispozici
samostatné boostery nejsou k dispozici**



SP¹-Suchá pumpa

Využití vakuové pumpy v průmyslu

(Pumpa / booster) jejich kombinace může být nakonfigurován pro optimální výkon v širokém spektru čistých a lehkých užitkových aplikací až po kruté náročné aplikace např.

-výroba solárních panelu

-vymrazování (farmaceuticky a potravinářský průmysl)

-sterilizace (plasma)

-nátěry (optický nátěr, nátěry na architektonické sklo)

-hutnictví (Tepelné zpracování, slinování)

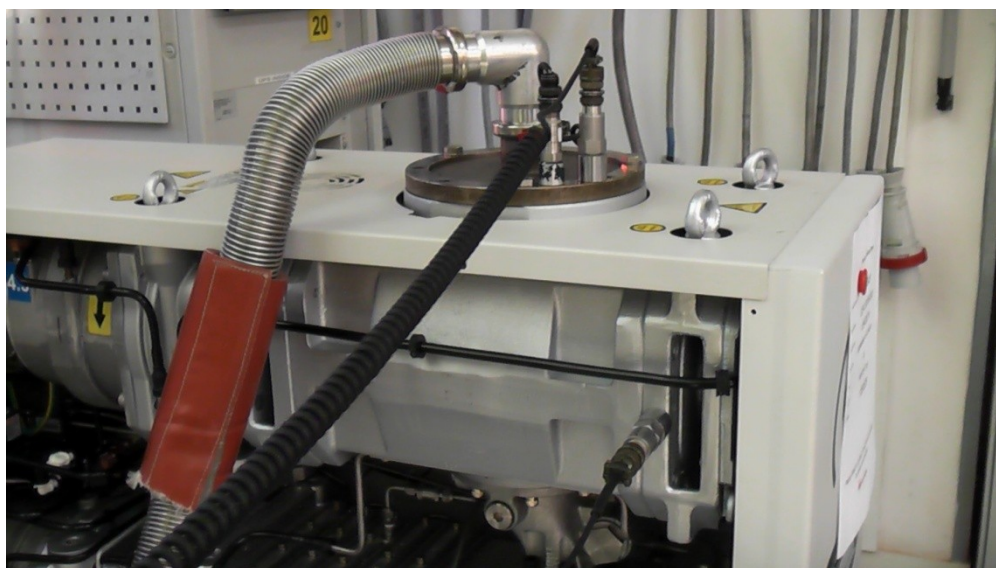
8 Aplikace vibrodiagnostiky na vakuovou pumpu

8.1 Volba měřící metody

Na měření vibrací jsme použili školní zařízení od výrobce Adash. Ke snímání signálu používá tento přístroj 2 snímače (akcelerometry). Měření proběhlo na pumpě GXS 250/2600

8.1.1 Průběh měření

Na vakuovou pumpu jsme umístili snímače na místo, kde umísťuje i společnost Edwards a druhý snímač jsme umístili na booster vakuové vývěvy (první snímač č.1 je umístěn vertikálně spolu se snímačem společnosti Edwards a druhý snímač č.2 je umístěn na boosteru a to horizontálně)viz obr. 25.



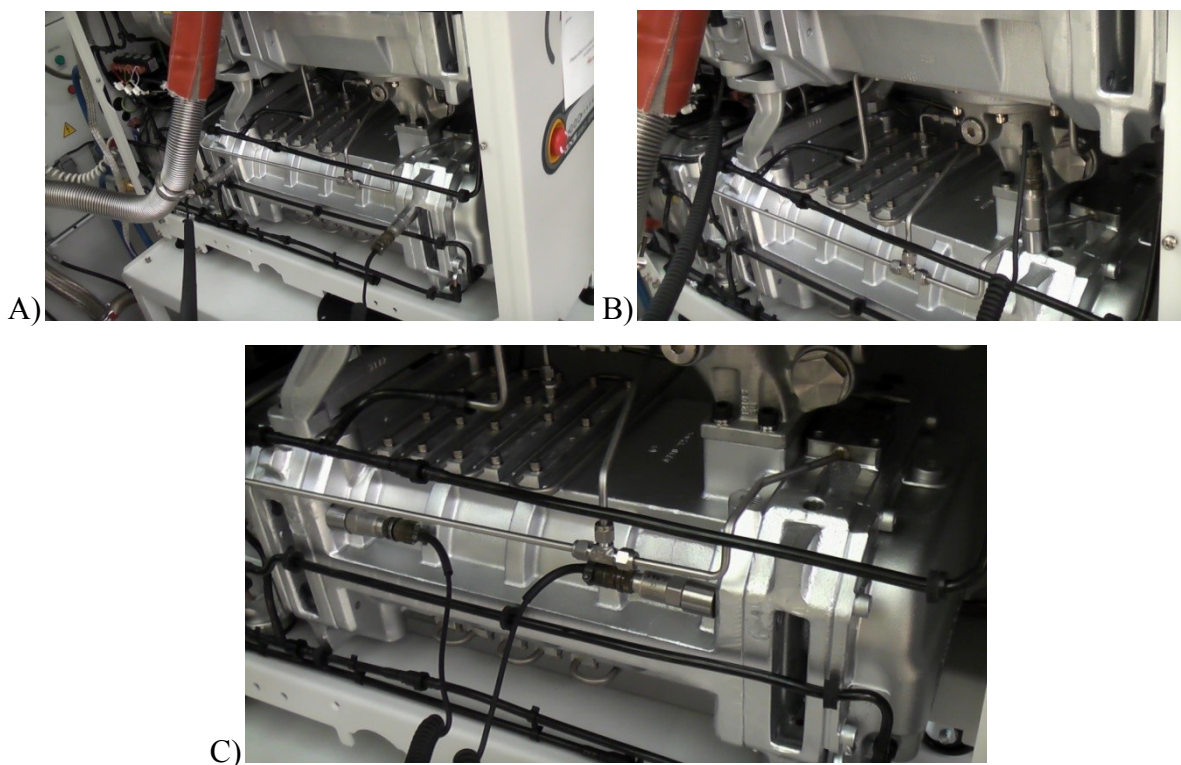
Obr. 25 Snímač umístěn na saní vakuové pumpy (vertikál) a druhý na boosteru(horizontál)

Vakuová pumpa byla v provozu a její otáčky byly 6600 ot/min při teplotě 120°C a booster měl otáčky 5340 ot/min při teplotě 70°C.Dále jsme umístily oba snímače na booster a to v horizontálním směru (snímač č. 1 je umístěn zleva)viz obr. 26.



Obr. 26 Umístění snímačů na booster vakuové vývěvy

Poslední umístění snímačů je na vakuovou pumpu a to ve směrech horizontálním vertikálním a axiálním (Snímač č. 1 je umístěn zleva)viz obr. 27.

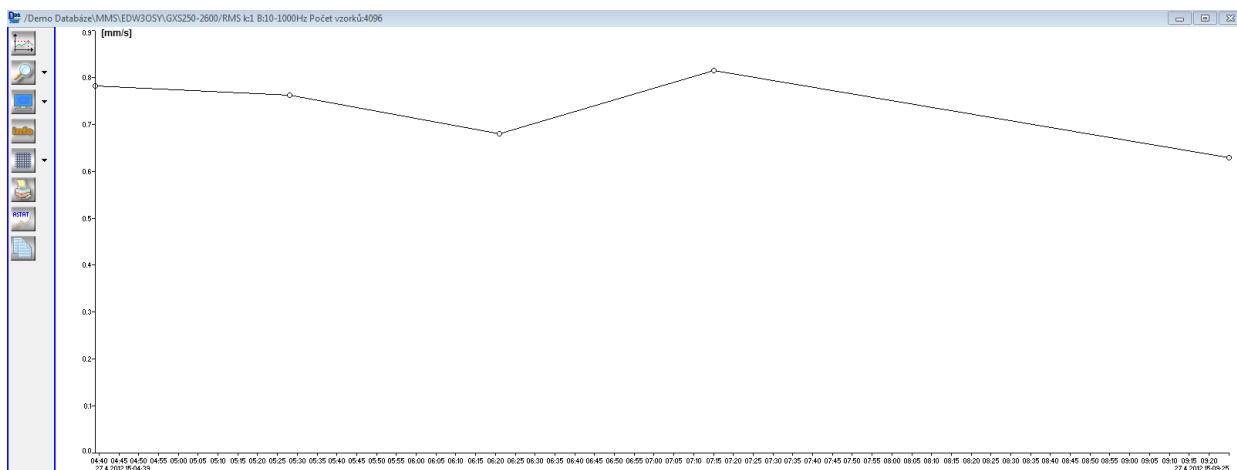


Obr. 27 Umístění snímačů na vakuovou pumpu A) v horizontálním směru B) ve vertikálním směru C) v axiálním směru.

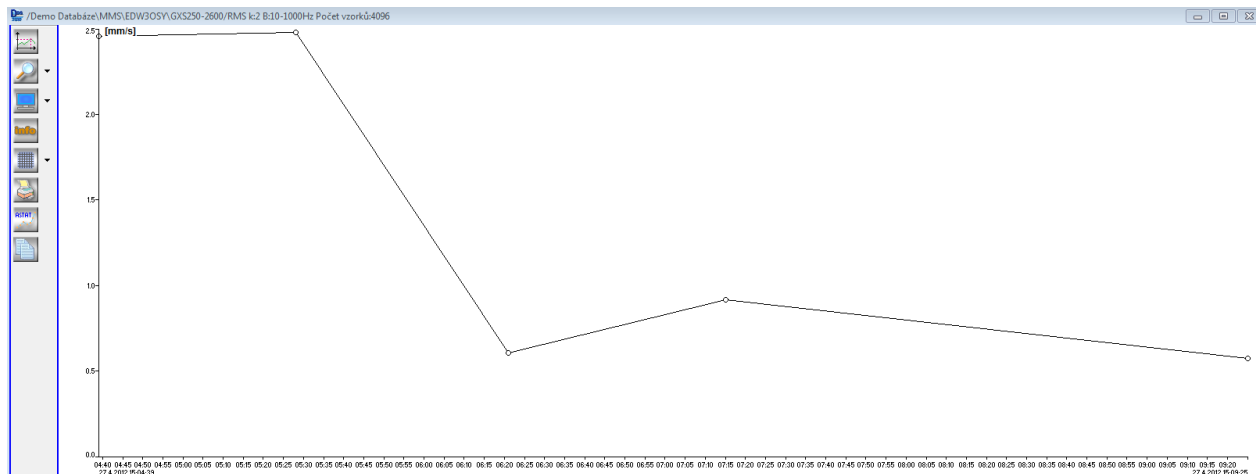
8.1.2 Vyhodnocení dat

Naměřené hodnoty jsme uložili a zpracovali v jednotlivých spektrech. Každý snímač má svoje vlastní spektrum. První 2 spektra nám ukážou velikost špiček (závislost vibrací na počtu 5 měření) viz obr. 28.

A)

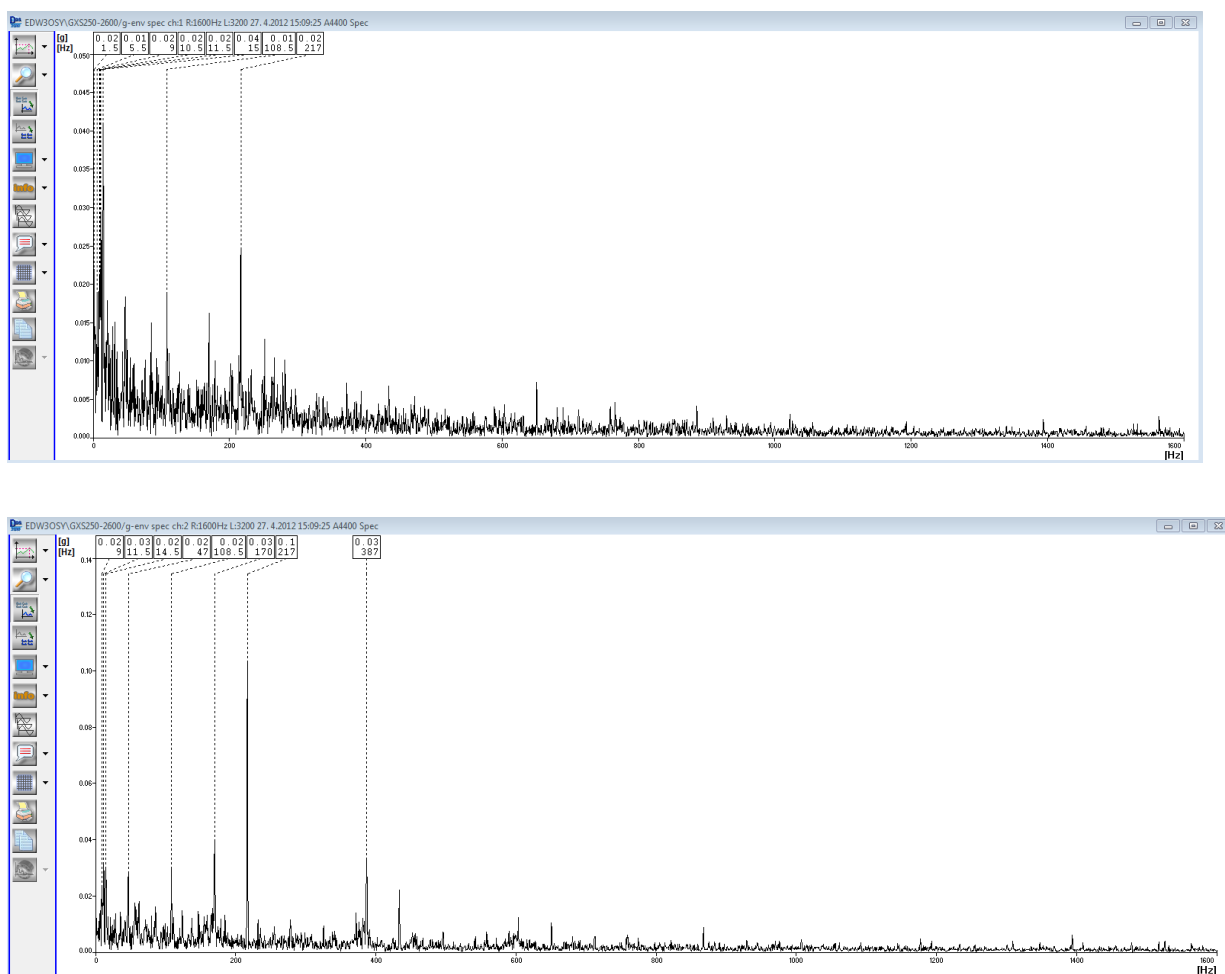


B)



Obr. 28 A) spektrum snímače č. 1 B) spektrum snímače č. 2

Dále jsme si znázornili 2 frekvenční spektra obálky a jejich lokální maxima vibrací, u obou snímačů (spektrum má rozsah frekvence 0-16000Hz)viz obr. 29



Obr. 29 A) Spektrum obálky snímáček č.1 B) spektrum obálky snímáček č.2

Naměřené hodnoty nám ukázaly, že největší špička (na snímáči č.2) je 2,5 a to na boosteru pumpy a druhá špička (na snímáči č.1) má největší vibraci 0,85 na pumpě. Tyto hodnoty splňují danou vibraci a nepřekročily kritickou mez danou společností Edwards.

9. Závěr

Při měření vibrací přístrojem Adash a měřicím přístrojem společnosti Edwards s.r.o. byl rozdíl v přesnějším měření přístrojem Adash, který pomocí dvou snímačů umístěné jak na pumpě, tak na boosteru nám ukazují vibraci jednotlivých částí na rozdíl od měření přístrojem společnosti, který má pouze jeden snímač umístěn na celé vakuové pumpě GXS ,kde vibrace jsou z celého zařízení a těžce se určují jednotlivé součásti, a proto bych navrhl systém měření vibrací na jednotlivých bodech vakuové pumpy, aby jsme mohly přesněji určit zdroj vibrací a předejít tak k zadření popř. poškození vakuové pumpy.

Použitá literatura:

- [1] HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: Technická Diagnostika a spolehlivost II Vibrodiagnostika. VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. Vydání s., ISBN 80-248-0650-9.
- [2] TŮMA, J.: Zpracování signálu získaných z mechanických systémů užitím FFT. Sdělovací technika Praha 199, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.
- [3] RANDALL, R.: Frequency Analysis. Brüel & Kjaer 1987.
- [4] NAVRÁTIL, M. – PLUHAŘ, O.: Měření a analýza mechanického kmitání. SNTL Praha 1985.
- [5] ERBEN, Milan . Vakuová technika : Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií [online]. [s.l.] : Univerzita Pardubice, 2008 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW:
<http://webak.upce.cz/~koanch/DOWNLOAD/Ucebni%20texty/Skriptum_vacuum.pdf>.